

АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ-
ТРИБОЛОГОВ
им. проф. А.В. ЧИЧИНАДЗЕ
при Российском Союзе Научных
и Инженерных Обществ

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ярославский государственный технический университет»

Международный Симпозиум по Трибологии ЯрТрибНорд-2021/YarTribNord-2021

14-15 сентября 2021 г., Ярославль

Сборник материалов симпозиума

ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

Ярославль
Издательство ЯГТУ
2022

ISBN 978-5-9914-0976-6

© Ярославский государственный технический университет, 2022

УДК 539.92
ББК 34.413

Международный Симпозиум по Трибологии ЯрТрибНорд-2021/
YarTribNord-2021: сб. материалов симпозиума, 14-15 сентября 2021 г. -
[Электронный ресурс] – Ярославль: Издательство ЯГТУ, 2022. – 1 CD-
ROM. – 141 с.

Сборник содержит труды Международного симпозиума по трибологии ЯрТрибНорд-2021/YarTribNord-2021 по следующим направлениям: Особенности трибологических процессов в северных климатических условиях; Трение и износ в сельскохозяйственном, транспортном и промышленном оборудовании; Микро- и нанотрибология, экологические и экономические проблемы; Трибологические материалы и покрытия: фрикционные и антифрикционные; Теоретические и экспериментальные методы моделирования трибологических процессов.

Симпозиум был приурочен к 100-летию юбилею лауреата Золотой медали по трибологии, профессора Автандила Виссарионовича Чичинадзе, организатора первых ярославских симпозиумов по трибологии.

Председатель оргкомитета: Президент Ассоциации инженеров-трибологов России, Юрий Михайлович Лужнов, д-р техн. наук, профессор

Минимальные системные требования:
PC Pentium IV, 512 Мб ОЗУ, Microsoft Windows XP/7,
Adobe Acrobat Reader, дисковод CD-ROM, мышь.

© Ярославский государственный технический университет, 2022

Программное обеспечение:
Microsoft OfficeWord, Adobe Acrobat

Программное обеспечение для воспроизведения электронного издания: Adobe Acrobat Reader, браузеры Google Chrome, Yandex

Под общей редакцией
канд. техн. наук А.В. Соколова, магистранта М.С. Ермакова

Редактор: В.Б. Доронина

Ответственные за электронное издание: М.А. Канакотина,
Л.С. Кокина.

Объем издания: 4,67 МБ
Комплектация издания: 1 CD-ROM

Ярославский государственный технический университет 150023,
г. Ярославль, Московский пр., 88, <http://www.ystu.ru>

Контактный телефон: 8 (4852) 44-12-70

СОДЕРЖАНИЕ

1	Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц. Трибофизика электрических контактов.....	6
2	С.В. Федосов, Б.М. Языев, С.Б. Языев. Трибология: перспективы в развитии науки о строительном материаловедении.....	11
3	Ю.И. Густов, И.В. Воронина, В.Н. Маркевич. Взаимосвязь показателей различных систем относительных опорных линий и сближений микрорельефа поверхностей трения.....	18
4	Ю.М. Лужнов, О.В. Чудина. Структурные аспекты поверхностного упрочнения деталей трибосопряжений.....	24
5	Ю.М. Лужнов, О.В. Чудина, А.В. Соколов. Повышение трибологических свойств сталей после модифицирования поверхности лазерным легированием с последующим азотированием.....	41
6	Р.Г. Канцев; М.А. Скотникова, А.А. Альхименко, В.В. Морозов, А.А. Москалец. Оценка тепловых потерь трубопроводов в контактных зонах паровых турбин.....	56
7	В. Янкаускас, Э. Новиковас. Исследование абразивного износа слоев, полученных ручной электродуговой наплавкой электродами с зёрнами твёрдого сплава.....	63
8	М.А. Шиллов, А.А. Бурков, Д.Н. Столбов, А.И. Смирнова, Н.В. Усольцева. Вязкоупругие свойства дисперсий малослойных графитовых фрагментов в пластичных смазках.....	72
9	А.М. Керопян, А.Ю. Албагачиев, А.В. Калакуцкий, П.Е. Митусов, М.С. Ермаков. Зависимость интенсивности износа от тепловых процессов в зоне контакта поверхностей колесно-рельсовой системы карьерных локомотивов.....	78
10	В.Д. Самусенко; И.А. Буяновский, В.А. Левченко. Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия в паре с керамическим контртелом при сухом трении и граничной смазке.....	85
11	А.А. Кострюков, А.В. Щедрин, Н.Ю. Чихачёва. Трибология на основе самоорганизации как фундаментальная база интенсификации "эффекта ребиндера" и решения "вечной проблемы трения" в экономике.....	92
12	А.П. Маслов, М.А. Старунский, Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная, М.В. Левцов. Особенности нагруженности трибосопряжений W-образного двигателя с прицепными шатунами....	96
13	Е.Н. Волнянко, А.В. Тимошенко. Улучшение износостойкости трибосистемы "колесо-рельс" экологически чистыми смазочными материалами.....	105
14	Ю.И. Густов, И.В. Воронина. Деформационно-топографический метод исследования триботехнических показателей строительной техники.....	107
15	Н.Г. Меликсетян. Особенности высокотемпературного трения	

	тормозных фрикционных безасбестовых полимерных материалов	114
16	Е.В. Сафронов, А.Л. Носко. Влияние угла установки фрикционной накладке центробежного фрикционного ролика на ее износ	122
17	Т.В. Погодина, А.В. Соколов. История золотой медали по трибологии в России.....	132

ТРИБОФИЗИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Н.К. Мышкин, д-р техн. наук, профессор, академик НАН Беларуси
В.В. Кончиц, канд. техн наук, доцент

Научно-исследовательский институт металлополимеров
Национальной академии наук Беларуси, Гомель

Выполнен анализ ключевых особенностей трения, смазки и изнашивания механического контакта в условиях протекания электрического тока. Рассмотрено влияние топографии поверхности и ее текстуры на реальную площадь контакта и ее проводимость. Даны рекомендации по повышению надежности и долговечности электрических контактов путем оптимизации их конструкции и выбора наиболее эффективных материалов и смазок.

Ключевые слова: топография поверхности, трение и смазка, надежность и долговечность

TRIBOPHYSICS OF ELECTRICAL CONTACTS

N.K. Myshkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician
of the National Academy of Sciences of Belarus
V.V. Konchits, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Metal-Polymer Research Institute of Belarus
National Academy of Sciences, Gomel

Analysis is made of the main peculiarities of friction, lubrication, and wear of mechanical contact at the presence of the electrical current. The effect of surface topography on the real area and conductivity of contact is described. Recommendations on the increasing of reliability and durability of electrical contacts are given due to optimization of design and proper selection of contact materials and lubricants.

Keywords: Surface topography, friction and wear, reliability and long life

Введение

Электрические контакты играют в современной технике очень важную роль, так как вся электрическая энергия передается через них. При этом, снижение контактного сопротивления и трения очень актуально. Развитие исследований электрических контактов совпало с бурным развитием трибологии. Фундаментальная монография по электрическим

контактам Р. Хольма [1] поставила ее автора в один ряд с такими основателями современной науки о трении как Ф. Боуден, И.В. Крагельский и Д. Тэйбор. Следует отметить активное развитие тематики электрических контактов в СССР Автандилом Виссарионовичем Чичинадзе, столетие со дня рождения которого мы отмечаем на нынешней конференции [2]. Появление междисциплинарного подхода в трибологии, предложенного П. Джостом в 1966 году [3,4], привело к тому, что многие виды электрических контактов стали объектами трибологических исследований [5,6].

Цель исследования

Целью данного анализа состояния исследований в области трибофизики электрических контактов является определение основных аспектов взаимосвязи физических процессов прохождения электрического тока в контакте твердых тел с геометрией и механикой контактного взаимодействия. Известно, что для большинства подвижных и значительной части неподвижных электрических контактов, ключевыми в эксплуатации являются трибологические факторы: влияние трения, смазки и изнашивания [1, 5, 6]. Для всех видов контактов, кроме сварных и паяных неподвижных контактов, нужно оценивать формирование фактической площади контакта с учетом влияния электрического тока. Кроме того, экономия энергии в них очень значима для глобального полезного эффекта трибологии, связанного со снижением потерь на трение и износ и их экологических последствий, связанных с загрязнением окружающей среды [7]. В последние годы быстрое развитие электротранспорта повысило актуальность исследований трибофизики электрических контактов.

Из-за волнистости и шероховатости поверхностей и присутствия пленок контакт всегда осуществляется на кластерах пятен намного меньшей площади, чем номинальный контакт [1, 5, 6]. Расположение кластеров пятен определяется волнистостью, а положение проводящих пятен шероховатостью. Быстрое развитие электроники потребовало изучения сопротивления наноконтактов, в которых экспериментальные измерения подтвердили квантовые эффекты проводимости [5, 6].

Поскольку применение высокочастотных устройств в современной технике постоянно расширяется, необходимо изучение и частотного эффекта для пятен контакта, распределенных в кластерах. Взаимовлияние проводящих ток пятен в контакте должно учитываться в расчетах сопротивления подобно учету напряженно-деформированного состояний в задачах контактной механики. Выполненная нами экспериментальная проверка дает возможность сделать практический вывод о том, что для снижения контактного сопротивления следует обеспечить максимальное

число и равномерность распределения пятен в площади контакта [5, 6].

Результаты

При разработке неподвижных контактов нужно обеспечить максимальную площадь контакта. Это достигается за счет повышения контактного давления при соответствующем увеличении площади проводящего контакта. На практике было показано, что секционирование неподвижных контактов в сочетании с обработкой поверхности и нанесением смазки позволяет значительно увеличить реальную площадь контакта и получить его более низкое электрическое сопротивление [5,6]. Эффективность подвижных контактов может быть также значительно повышена за счет увеличения количества параллельных проводящих мостиков. В частности, известно применение разрезных и комбинированных из волокон щеток для электрических машин. Такие щетки были разработаны для сильноточных электрических машин, например, униполярных двигателей [5,6].

Волоконные щетки эффективно работают при высоких скоростях и плотностях тока. Металлические и углеродные щетки такого типа могут работать без смазки с малым износом, благодаря малому контактному давлению на равномерно распределенных по площади микроконтактах. Окисные или другие изоляционные пленки могут осложнить работу волоконистых щеток, и присутствие тонкой пленки смазки желательно, поскольку она обеспечивает скольжение при малом коэффициенте трения и износе.

Обсуждение

Множество параллельных электрических и механически независимых контактов обеспечивают надежный контакт и отсутствие искрения. Эффективным может быть и формирование регулярной текстуры поверхности. Такие текстуры могут уменьшить сопротивление за счет равномерного распределения проводящих ток выступов, а впадины на поверхности являются карманами для смазки и продуктов изнашивания. Прогресс инженерии поверхностей сделал возможным формирование разнообразных регулярных текстур [5, 6]. Кроме того, в настоящее время в электрических контактах используют различные типы специальных смазок [5, 6]. Дальнейший прогресс в решении проблем трибофизики электрических контактов связан с разработкой новых высокоэффективных материалов, обладающих оптимальной комбинацией механических, триботехнических и электрофизических характеристик. При этом, поскольку эти характеристики трудно сочетать в каком-то одном материале,

естественным выходом становится разработка композитов, сочетающих компоненты из разных классов материалов – металлов, полимеров, керамики. Прогресс в материаловедческих технологиях, в частности разработки наноразмерных наполнителей, позволяет надеяться на появление эффективных композитов для современной техники, в частности в актуальной и экологически перспективной области электротранспорта.

Заключение

Современная трибология оказывает глобальный эффект на все области деятельности человеческого общества. Потери от трения и изнашивания в экономике развитых стран составляют несколько процентов ВВП, а потери энергии только на транспорте доходят до трети в общих энергетических затратах [3, 4, 7].

Глобальная экология также в значительной мере зависит от решения трибологических проблем. Электрический контакт во многих случаях является сложной трибосистемой, и требуется рассматривать состояние поверхности контакта, прохождение через нее электрического тока, трение, изнашивание, изменения структуры и состава материалов контакта и пленок на поверхности. Технический прогресс требует новых решений при конструировании, разработке материалов, покрытий и смазок для электрических контактов, чтобы оптимизировать механические и электрические потери. Новые методы инженерии поверхности и разработки специальных смазочных материалов делают реальным дальнейшее повышение эффективности и надежности электрических контактов [5, 6]. Тем не менее, имеются еще многие ресурсы в данной области, прежде всего, в исследованиях и разработках новых композиционных материалов, в том числе, наноструктурированных композитов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках проекта T21ЭТ-018, направленного на разработку эффективных и экологичных смазочных материалов для электротранспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хольм, Р. Электрические контакты / Перевод с англ. Д.Э. Брускина и А.А. Рудницкого. – М.: Изд. Ин. Лит., 1961. – 464 с.
2. Чичинадзе, А.В. Трение и износ электрических контактов: справочник / А.В. Чичинадзе, Н.К. Мышкин, глава 30, под. ред. И.В. Крагельского и В.В.Алисына, том 2. - М: Машиностроение, 1979. - С. 334-349.

3. Jost P. Brief Notes // Int. Conference “50th Anniversary of the Jost Report”. – London: ImechE, 2016.
4. Мышкин, Н.К. Трибология: тенденции полувекового развития / Н.К. Мышкин И.Г. Горячева // Трение и износ. – 2016. – Т 37, № 6. – С. 665-669.
5. Мышкин, Н.К. Электрические контакты: Монография / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. – 560 с.
6. Braunovic, M. Electricalcontacts. Fundamentals, Applications and Technology / M. Braunovic, V.V. Konchits, N.K. Myshkin. - CRC Press, New York, 2007. – 646 p.
7. Holmberg, K. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / K. Holmberg, A. Erdemir. - Friction, 2017. – Vol. 5. – No. 3. pp 263-284.

УДК 624.04

ТРИБОЛОГИЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ В РАЗВИТИИ НАУКИ О СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

С.В. Федосов¹, д-р техн. наук, профессор, академик РААСН
Б.М. Языев², д-р техн. наук, профессор
С.Б. Языев², канд. техн. наук, доцент

¹Московский государственный строительный университет

²Донской государственный технический университет

В статье ставится и решается проблема создания полимерных композиционных материалов с заданными свойствами. Данная операция включает как минимум два этапа: экспериментально-технологический (создание искусственной неоднородности) и расчетно-аналитический (решение обратных задач механики полимеров, частности, определение таких зависимостей упругих констант конструкционного материала от координат, в которых будет задано состояние конструкции. Приведен вывод разрешающего уравнения, численное и аналитическое решение задачи, а также описание технологического эксперимента.

Ключевые слова: неоднородность, критерии прочности, деформация, напряжения, равнонапряженность, равнопрочность

TRIBOLOGY: PROSPECTS IN THE DEVELOPMENT OF THE SCIENCE OF BUILDING MATERIALS SCIENCE

S.V. Fedosov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Academician of the RAASN
B.M. Yazyev², Doctor of Technical Sciences, Professor
S.B. Yazyev², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

¹Moscow State University of Civil Engineering

²Don State Technical University

The article poses and solves the problem of creating polymer composite materials with desired properties. This operation includes at least two stages: experimental and technological (creating artificial heterogeneity) and computational and analytical (solving inverse problems of polymer mechanics, in particular, determining such dependences of the elastic constants of a structural material on the coordinates in which the state of the structure will be set). Numerical and analytical solution of the problem,

as well as a description of the technological experiment.

Keywords: *heterogeneity, strength criteria, deformation, stresses, uniform tension, equal strength.*

Введение

Как известно, причины, вызывающие неоднородность в материале, могут быть различны. Например, введение в состав полимерного связующего определенного объема или веса наполнителя вызывает изменение как прочностных, так и деформативных характеристик материала [1]. Нельзя не упомянуть о том, что так называемая косвенная неоднородность может возникнуть вследствие технологических процессов при изготовлении изделия, каких-либо конструктивных особенностей, а также в результате воздействия физических полей. Соответственно, учет возникающей по той или иной причине неоднородности материала приводит часто к существенному перераспределению напряжений в самой конструкции в целом. Причем это перераспределение носит зачастую не только количественный, но и качественный характер.

С точки зрения конструкторов и технологов, представление методологии, позволяющих с наибольшей эффективностью использовать прочностные характеристики материала — это перспективное направление в развитии материаловедении.

Некоторые проблемы не позволяют создать универсальный метод конструирования композиционных материалов с заданными свойствами так как отсутствует общепринятое теоретическое обоснование количественных и качественных критериев, которые могли бы научно обосновать требования к связующему и наполнителю [2].

Процесс конструирования включает, по крайней мере, два этапа: расчетно-аналитический и экспериментально-технологический.

Расчетно-аналитический этап включает в себя решение обратных задач механики полимеров, в частности, отыскании таких зависимостей механических характеристик материала конструкции от координат, при которых состояние конструкции будет заданным.

Второй этап включает в себя создание искусственной неоднородности.

Материалы и методы

Решая обратную задачу, будем задаваться определенным критерием прочности, в соответствии с которым определим законы изменения механических характеристик материала от координат

нат.

Ранее такие задачи для цилиндра на трех классических теорий прочности решалась академиком В.И. Андреевым, проф. Б.М. Языевым и доц. А.С. Чепурненко [3,4,5]. Здесь же представлено решение с использованием теории прочности Мора.

Бесконечно длинный цилиндр, с внутренним радиусом a и внешним радиусом b , подвержен действию внутреннего p_a и внешнему давлению p_b (рис.1). Полимерный цилиндр находится в условиях плоской осесимметричной деформации ($\varepsilon_z = 0$).

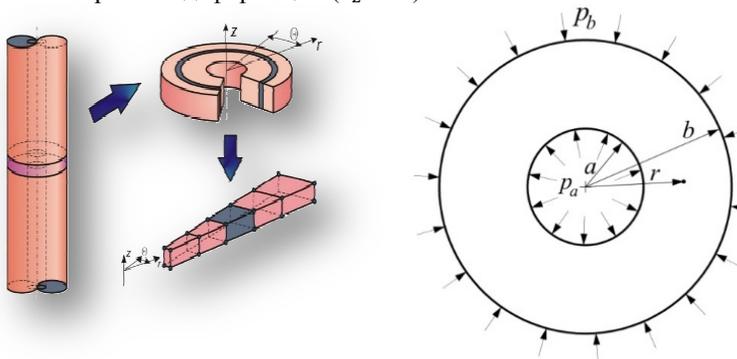


Рис. 1. Расчетная схема для толстостенного цилиндра [3]

При отсутствии объемных сил и вынужденных деформаций, основное разрешающее дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами относительно σ_r имеет вид [3]:

$$\sigma_r'' + \left(\frac{3}{r} - \frac{E'}{E} \right) \sigma_r' - \frac{m E'}{r E} \sigma_r = 0, \quad (1)$$

здесь $m = \frac{1-2\nu}{1-\nu}$ для плоского деформированного состояния (ПДС). В уравнении (1) и далее штрих над переменной - производная по радиусу.

На внутренней и внешней грани цилиндра заданы сжимающие напряжения:

$$\sigma_r(a) = -p_a; \sigma_r(b) = -p_b. \quad (2)$$

Постановка задачи включает рассмотрение таких нагружений, при которых максимальные окружные напряжения являются растягивающими:

$$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r.$$

Приведем по соответствующим теориям прочности эквивалентное

напряжение, которое имеет вид соответственно:

$$\sigma'_{\text{ЭКВ}} = \sigma_{\theta}, \text{ (ПНС и ПДС)}$$

$$\sigma''_{\text{ЭКВ}} = \sigma_{\theta} - \nu(\sigma_r + \sigma_z) = (1 - \nu^2) \left(\sigma_{\theta} - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_r \right). \text{ (ПДС)}$$

$$\sigma'''_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\theta} - \sigma_r. \text{ (ПНС и ПДС)}$$

По упрощенной теории прочности Мора [4,5] эквивалентное напряжение имеет вид:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 - \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \sigma_3 = \sigma_{\theta} - \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \sigma_r, \quad (3)$$

здесь $[\sigma_p]$ и $[\sigma_c]$ допускаемые напряжения на растяжение и сжатие, ПНС — плоское напряженное состояние, ПДС — плоское деформированное состояние.

Можно обобщить $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ для всех теорий прочности, записав в виде линейной функции от напряжений σ_{θ} и σ_r :

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = (\sigma_{\theta} - k_1 \sigma_r) k_2. \quad (4)$$

Для соответствующих теорий, значения коэффициентов k_1 и k_2 сведены в таблица 1 [5].

Таблица 1. Коэффициенты k_1 и k_2 для соответствующих теорий прочности [5]

Соответствующая теория	1-я	2-я		3-я	Теория прочности Мора
		ПНС	ПДС		
k_1	0	ν	$\frac{\nu}{1 - \nu}$	1	$[\sigma_p] / [\sigma_c]$
k_2	1	1	$1 - \nu^2$	1	1

Рассматриваемый цилиндр считается равнонапряженным если $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ по всей толщине цилиндра будет постоянным [1]. Здесь $k_2 = 1$:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \text{const} \Rightarrow \frac{d}{dr} [(\sigma_{\theta} - k_1 \sigma_r)] = 0. \quad (5)$$

Через уравнение равновесия можно получить соотношение

$$r \frac{d\sigma_r'}{dr} = (k_1 - 2) \sigma_r'. \quad (6)$$

Проделов операцию разделение переменных в уравнении (6), затем проинтегрировав, получим:

$$\sigma_r = \begin{cases} \frac{C_1 r^{k_1 - 1}}{k_1 - 1} + C_2, & \text{при } k_1 \neq 1 \\ C_1 \ln r + C_2, & \text{при } k_1 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Постоянные интегрирования C_1 , C_2 для $k_1 \neq 1$ и $k_1 = 1$ определяем

из граничных условий (2):

$$\text{при } k_1 \neq 1 \begin{cases} \frac{C_1 a^{k_1-1}}{k_1-1} + C_2 = -p_a; \rightarrow C_1 = \frac{(k_1-1)(p_a-p_b)}{b^{k_1-1}-a^{k_1-1}}; \\ \frac{C_1 b^{k_1-1}}{k_1-1} + C_2 = -p_b. \rightarrow C_2 = \frac{p_b a^{k_1-1} - p_a b^{k_1-1}}{b^{k_1-1} - a^{k_1-1}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{при } k_1 = 1 \begin{cases} C_1 \ln a + C_2 = -p_a; \rightarrow C_1 = \frac{p_a - p_b}{\ln b - \ln a}, \\ C_1 \ln b + C_2 = -p_b. \rightarrow C_2 = \frac{p_b \ln a - p_a \ln b}{\ln b - \ln a} \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, учитывая найденные константы при $k_1 \neq 1$ и $k_1 \neq (1-m)$ решением обратной задачи при эквивалентном напряжении, определяемом по формуле(4), выступает выражение (10):

$$E(r) = C_0 (B r^{k_1-1} + C) \frac{A}{B^{k_1-1}} = C_0 \left(\frac{(p_a - p_b)(m + k_1 - 1)r^{k_1-1} + m(p_b a^{k_1-1} - p_a b^{k_1-1})}{b^{k_1-1} - a^{k_1-1}} \right)^{\frac{k_1+1}{k_1-1+m}} \quad (10)$$

здесь C_0 – константа интегрирования, $A = C_1(k_1 + 1)$, $B = C_1 \left(\frac{m}{k_1-1} + 1 \right)$, $C = C_2 m$

При $k = (1-m)$ и $k = 1$ — соответственно формулы (11) и (12):

$$E(r) = C_0 \exp \left(r^{-m} \frac{(p_a - p_b)(2-m)}{(p_b a^{-m} - p_a b^{-m})m} \right). \quad (11)$$

$$E(r) = C_0 \left[\frac{(p_a - p_b)(1 + m \ln r) + m(p_b \ln a - p_a \ln b)}{\ln b - \ln a} \right]^{\frac{2}{m}}. \quad (12)$$

Результаты

На рис. 2 приведен график изменения модуля Юнга E как функции от r и k_1 . Кривая построена в случае плоского напряженного состояния при соотношении внешнего и внутреннего радиуса $b/a = 1.5$, внутреннего давления $p_a = 1$, и коэффициента Пуассона $\nu = 0.3$.

Коэффициент k_1 варьируется в пределах от 0 до 1. Из рис. 2 видно, что наименьший перепад между модулем упругости на внутренней и внешней поверхности для равнонапряженного цилиндра наблюдается при $k_1 = 0$, т.е. что соответствует первой теории прочности.

С ростом коэффициента k_1 величина $E(b)/E(a)$ возрастает и достигает своего максимального значения при $k_1 = 1$, т.е. по третьей теории прочности.

При $k_1 = 0: E(b)/E(a) = 1.59$, а при $k_1 = 1: E(b)/E(a) = 2.6$.

Обсуждение

Создание равнонапряженности может приводить к существенному экономическому эффекту. На рис. 3, показаны кривые распределения эквивалентных напряжений по третьей теории прочности для однородного (штриховая линия) и равнонапряженного (сплошная линия) цилиндра, находящихся в условиях ПНС, при следующих исходных данных [5]: $a = 15$ см, $b = 28$ см, $\nu = 0.3$, $p_a = 10$ МПа.

Максимальные эквивалентные напряжения за счет неоднородности снизились с 27.9 МПа до 16 МПа, т. е. в 1.7 раз.

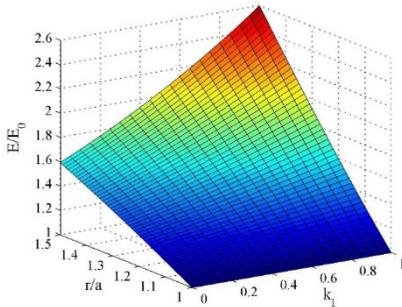


Рис. 2. Зависимость $E = E(r, k_1)$ [5]

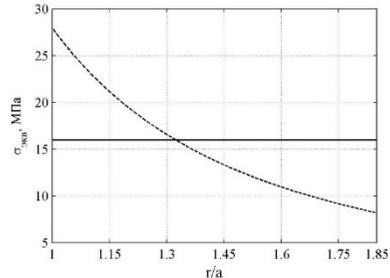


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений для равнонапряженного и однородного цилиндра [1]

Заключение

Представлен результат решения задачи оптимизации для толстостенного цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления. Эквивалентное напряжение связана функционально в виде линейной комбинации окружных и радиальных напряжений. Такая комбинация является обобщением всех теорий прочности.

На основе обобщенной теории прочности аналитически получен закон изменения модуля упругости по толщине толстостенной трубы, при котором она будет равнонапряженной по обобщенной теории прочности при действии внутреннего и внешнего давления.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что так называемая синтетическая функциональная зависимость модуля Юнга от радиуса привело к оптимизации конструкции, а именно, увеличению сопротивляемости цилиндра внешним силовым воздействиям при неизменной толщине в 1.35 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: монография. - М.: Издательство АСВ, 2002. - 288 с.
2. Рабинович, А.Л. Некоторые основные вопросы механики армированных пластиков. - М., 1966. – 368 с.
3. Языев, Б. М. Нелинейная ползучесть непрерывно неоднородных цилиндров: дисс. канд. техн. наук: 01.02.04.- М., 1990. - 171 с.
4. Андреев, В.И. О способе создания оптимальных конструкций на основе решения обратных задач теории упругости неоднородных тел / В. И. Андреев, И. А. Потехин // Вестник Отделения строит. наук Российской академ. Архитект. и строит. наук. - 2007. - № 11. - С. 48–52.
5. Дудник, А.Е. Моделирование прочностных характеристик и прогнозирование несущей способности напорных труб из полиолефинов: дис. ... канд. техн. наук. - Нальчик, 2016. - 133 с.

УДК 620.178.16

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОПОРНЫХ ЛИНИЙ И СБЛИЖЕНИЙ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Ю.И. Густов, д-р техн. наук, профессор

И.В. Воронина, ст. преподаватель

В.Н. Маркевич, ст. лаборант

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрены системы относительных опорных линий и сближений микро рельефа поверхностей трения с линейной и степенными функциями относительных опорных линий для установления взаимосвязей ее размерно-деформационных показателей.

***Ключевые слова:** взаимосвязь, система, опорная линия, сближение, микро рельеф, поверхность трения, гипсограмма, показатель, микроизнос, микрома териал, полюс, деформация, упрочнение, температура, износостойкость.*

RELATIONSHIP OF INDICATORS OF DIFFERENT SYSTEMS OF RELATIVE REFERENCE LINES AND APPROACHES OF THE MICRO-RELIEF OF FRICTION SURFACES

Yu. I. Gustov, Doctor of Technical Sciences, Professor

I.V. Voronina, Senior Lecturer

V.N. Markevich, Art . Laboratory Assistant

Moscow State of Civil engineering (National Research University)

Systems of relative reference lines and approximations of the microrelief of friction surfaces with linear and power functions of relative reference lines are considered to establish the relationships of its dimensional and deformation indicators.

***Keywords:** relationship, system, reference line, convergence, microrelief, friction surface, gypsum graph, indicator, micro-wear, micro-material, pole, deformation, hardening, temperature, wear resistance*

Введение

Изучение нормализованной системы относительных опорных линий и сближение связано с различными видами кривой опорных линий (гипсограммы). Поэтому установление взаимосвязей между размерно-деформационными показателями системы сопряжено с их неоднозначностью. В связи с этим напрашивается рассмотрение базовой системы, за которую принимает система с линейной кривой опорных линий. В реальных эксплуатационных условиях такая система или близкая к ней встречается и не является умозрительной.

Привлекательность принятой системы заключается в том, что в ней однозначно определены координатные показатели относительных сближений и соответствующих опорных линий: центров тяжести парциальных величин микроизноса и микроматериала и полюса системы. В этом случае представляются определенными (конкретными) и размерно-деформационные характеристики опорной кривой. Они могут служить базовыми для соответствующих показателей нелинейных систем.

Материалы и методы

Для линейной системы относительных опорных линий и сближений (рис.1) относительная длина гипсограммы L_γ - опорной линии равна $L_\gamma = \sqrt{2} = 1,4142$

Составляющая гипсограммы $L_{\gamma a}$, соответствующая относительному сближению ε_a центра тяжести парциального микроизноса C_a , равна $L_{\gamma a} = (2 \cdot 0,666^2)^{0,5} = 0,942$.

Относительная длина гипсограммы $L_{\gamma p}$ при полюсном сближении ε_p составляет $L_{\gamma p} = 0,5 L_\gamma = 0,7071$; длина $L_{\gamma m}$ при сближении ε_m равняется $L_{\gamma m} = (2 \cdot 0,333^2)^{0,5} = 0,471$.

Микропластические деформации линейной системы при относительных сближениях ε_a , ε_p и ε_m принимаются равными

$$\delta_a = 0,5(1 - t_{pa}), \quad (1)$$

$$\delta_p = 0,5(1 - t_{pa}), \quad (2)$$

$$\delta_m = 0,5(1 - t_{pm}). \quad (3)$$

где t_{pa} , t_{pp} и t_{pm} соответствующие указанным сближениям относительные опорные линии.

На основе предварительного анализа показателей системы сфор-

мулированы и подлежат экспериментальной проверке следующие зависимости

$$L_{\gamma a} = \left(\delta_a^{\delta a} \right)^{\delta m}, \quad (4)$$

$$L_{\gamma p} = \left(\delta_p^{\delta p} \right), \quad (5)$$

$$L_{\gamma m} = \left(\delta_m^{\delta m} \right)^{1/\delta a}. \quad (6)$$

Для проверки использованы линейная (рис. 1) и степенная (рис. 2) нормализованные системы тр-ε. [1]

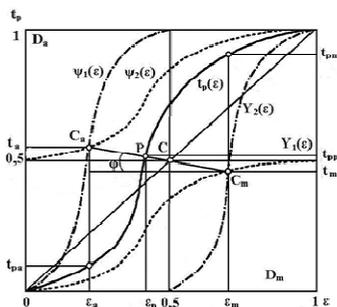


Рис. 1. Гипсоцентридная модель изнашивания [1]

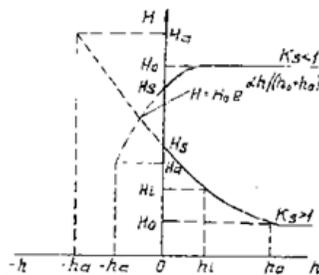


Рис. 2. Склеробитическая модель изнашивания [1]

Системы трибдеформационного уплотнения поверхностей K_s и продуктов износа K_a оценивались по выражениям

$$\text{при } D_m < 0,618 \quad K_s = L_{\gamma a} / L_{\gamma p}, \quad \text{при } D_m > 0,618 \quad K_s = L_{\gamma p} / L_{\gamma a} \quad (7)$$

$$\text{при } D_m < 0,618 \quad K_a = L_{\gamma a} / L_{\gamma m}, \quad \text{при } D_m > 0,618 \quad K_s = L_{\gamma m} / L_{\gamma p} \quad (8)$$

Рассчитанные значения по (7) и (8) сопоставлялись с величинами [2- 5]

$$K_s = \left(0,618 / D_m \right)^{D_m / D_a} \quad (9)$$

$$\text{при } D_m < 0,618 \quad K_a = K_s \left[K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5} \right] \quad (10)$$

$$\text{при } D_m > 0,618 \quad K_a = K_s \left[K_s^2 + (K_s - 1)^2 \right] \quad (11)$$

Результаты и анализ исследования

Исходные и расчетные показатели линейной системы относительных спорных линий и сближений ($tr-\epsilon$) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели линейной системы $tr-\epsilon$

t_{pa}	t_{pp}	t_{pm}	δ_a	δ_p	δ_m	$L_{\gamma a}$	$L_{\gamma p}$	$L_{\gamma m}$	K_s по (7)	K_a по (8)	K_s по (9)	K_a по (10)
0,333	0,500	0,666	0,333	0,250	0,167	0,941	0,7071	0,408	1,332	2,00	1,236	1,975

Источник: Составлено авторами

По результатам исследования можно отметить следующее:

1. Расчеты $L_{\gamma a}$ и $L_{\gamma p}$ по формулам (4) и (5) обеспечивают точное совпадение с фактическими (расхождение $\Delta=0,128$ и $0,0\%$).

Расчет по зависимости (6) дает значение $L_{\gamma m}=0,408$, отличающееся от системного ($L_{\gamma m}=0,471$) на $13,4\%$. Такое расхождение можно считать приемлемым.

2. Определение K_s по формулам (7) и (9) характерно незначительным расхождением значений $\Delta=7,8\%$. Расчет K_s по (8) и (10) дают практически совпадающие значения (расхождение $1,27\%$). Значения $K_s>1$ и $K_a>1$ свидетельствуют о трибодеструкционном упрочнении поверхности и продуктов износа.

Расчетные и фактические показатели для степенной системы относительных опорных линий и сближений при $D_m>D_{m\gamma}=0,618$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Показатели для степенной системы относительных опорных линий и сближений

t_{pa}	t_{pp}	t_{pm}	δ_a	δ_p	δ_m	$L_{\gamma a}$	$L_{\gamma p}$	$L_{\gamma m}$	K_s по (7)	K_a по (8)	K_s по (9)	K_a по (10)
0,520	0,660	0,880	0,240	0,170	0,060	$\frac{0,980}{0,920}$	$\frac{0,740}{0,800}$	$\frac{0,495}{0,500}$	$\frac{0,755}{0,870}$	$\frac{0,669}{0,625}$	0,880	0,669

Источник: Составлено авторами

По табличным показателям можно заключить следующее:

1. Рассчитанные (в числителе) и фактические системные (в знаменателе) величины $L_{\gamma a}$, $L_{\gamma p}$ и $L_{\gamma m}$ находятся в близком соответствии: расхождения соответственно составляют $\Delta=6,5$; $7,5$ и $1,0\%$.

2. Для представленной степенной системы характерно трибодеструкционное разупрочнение поверхностей ($K_s<1$) и продуктов износа ($K_a>1$). Расхождение расчетных по (7) значений составляет $\Delta=13,2\%$, по

(8) $\Delta=7,0\%$.

3. Расчеты по апробированным (9) и (11) и предлагаемым (7) и (8) зависимостям дают вполне удовлетворительное совпадение показателей: расхождение между значениями K_s составляет 14,2 %, между K_a 0,0 %. Фактические системные значения K_s (0,87) и K_a (0,625) также близки расчетным по (9) и (11); расхождение $\Delta=1,15\%$ и $\Delta=7,0\%$.

Расчетные и фактические показатели степенной системы относительных опорных линий и сближений при $D_m < D_{mv} = 0,618$ приводятся в таблице 3.

Таблица 3. Показатели степенной системы t_p - ε при $D_m < D_{mv}$.

t_{pa}	t_{pp}	t_{pm}	δ_a	δ_p	δ_m	$L_{\gamma a}$	$L_{\gamma p}$	$L_{\gamma m}$	K_s по (7)	K_a по (8)	K_s по (9)	K_a по (10)
0,120	0,490	0,900	0,440	0,255	0,050	$\frac{0,982}{1,00}$	$\frac{0,706}{0,700}$	$\frac{0,263}{0,280}$	$\frac{1,390}{1,429}$	$\frac{2,684}{2,50}$	1,315	2,245

Источник: Составлено авторами

На основании результатов таблицы 3 можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Расчетные и остальные размеры $L_{\gamma a}$, $L_{\gamma p}$ и $L_{\gamma m}$ находятся в близком соответствии: расхождения соответственно составляют $\Delta=1,83$; 0,86 и 6,46%.

2. Рассчитанные (в числителе) и системные (в знаменателе) значения K_s и K_a близки между собой: расхождение для K_s $\Delta=2,7\%$, для K_a $\Delta=7,36\%$.

3. Между апробированными зависимостями (9) и (10) и предлагаемыми выражениями (7) и (8) наблюдается положительная корреляция: расхождения значений K_s и K_a составляют $\Delta=2,96$ -8,67% и $\Delta=11,3$ -19,6 % соответственно.

Заключение

На основе полученных результатов можно полагать, что линейная система относительных опорных линий и сближений, как наиболее простая из числа возможных, является более доказательной с точки зрения достоверности взаимосвязей между ее показателями.

Так, взаимосвязи между относительными составляющим гипсограммы линейной системы подтвердились в случаях трибоупрочняющихся и разупрочняющихся степенных функций.

Показана адекватность апробированных и полученных в работе расчетных зависимостей для определения степеней упрочнения и разу-

прочнения поверхностей трения и продуктов износа. Это дает возможность контролировать достоверность расчетных степеней упрочнения-разупрочнения.

Полученные материалы на примере различных типов систем t_p -свидетельствуют о самоорганизации процессов трения и изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Густов, Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования: Монография. М.: Московский строительный университет. - МГСУ, 2011. 192 с.
2. Густов, Ю.И. Методология исследования трибомеханических показателей строительной техники / Ю.И. Густов, И.В. Воронина, А.А. Орехов // Механизация строительства. - 2011. - № 8. - С. 10-12.
3. Густов, Ю.И. Микротопографические показатели поверхностей трения строительных машин и оборудования / Ю.И. Густов, К.А. Любушкин, А.А. Орехов // Вестник МГСУ. - 2013. - № 9. - С. 179-184.
4. Густов, Ю.И. Механизмы абразивного изнашивания и коэффициенты полезного действия строительной техники / Ю.И. Густов, Д.Ю. Густов, А.А. Юшков // Механизация строительства. - 2016. - № 9. - С. 50-54.
5. Густов, Ю.И. Трибологические показатели рабочих органов и сопряжений строительной техники / Ю.И. Густов, Д.Ю. Густов, И.В. Воронина // Интерстрой-мех-2015.- М: КазГАСУ, 2015. - С. 68-73.

УДК 621.787

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Ю.М. Лужнов¹, д-р техн. наук, профессор
О.В. Чудина², д-р техн. наук, профессор

¹АО Всероссийский научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта (Москва)

²Московский автомобильно-дорожный государственный университет
(МАДИ)

В статье описаны процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта в реальных условиях эксплуатации, проанализированы существующие материаловедческие подходы к вопросам разрушения поверхности при трении, изучены структурные аспекты поверхностных слоев, способных эффективно противостоять изнашиванию. Сформулированы условия структурной самоорганизации поверхностей трения на мезо-, микро- и наноуровне. Приведены примеры современных технологий поверхностного упрочнения, реализующие наиболее благоприятные и эффективные упрочняющие механизмы для повышения усталостных характеристик деталей трибосопряжений.

Ключевые слова: трение, износостойкость, структура, самоорганизация, упрочняющие механизмы

STRUCTURAL ASPECTS OF SURFACE HARDENING OF TRIBO-COUPLING PARTS

Yu. M. Luzhnov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
O. V. Chudina², Doctor of Technical Sciences, Professor

¹AO All-Russian Research Institute of Railway Transport (Moscow)

²Moscow Automobile and Road Construction State University (MADI)

The article describes the processes occurring in the zone of friction contact in real operating conditions, analyzes the existing materialistic approaches to the destruction of the surface during friction, studies the structural aspects of surface layers that can effectively resist wear. The conditions of structural self-organization of friction surfaces at the meso-, micro- and nanoscale are formulated. Examples of modern surface hardening technologies that implement the most favorable and effective streng-

thening mechanisms to increase the fatigue characteristics of tribo-conjugation parts are given.

Keywords: *friction, wear resistance, structure, self-organization, strengthening mechanisms*

Введение

Решение проблемы повышения качества, надежности и долговечности машин и механизмов неразрывно связано с развитием фундаментальных и прикладных исследований в области трибологии. Главная задача трибологии – это содействие технологическому прогрессу и экономической выгоде за счет внедрения имеющегося опыта, изучения последних достижений трибологии и составления рекомендаций для промышленности [1].

Первостепенную роль в решении этой задачи играет рациональное конструирование узлов, правильный выбор материалов по критериям трения и износостойкости, оптимизация условий эксплуатации. Инженерные расчеты в задачах трения могут быть целесообразными только тогда, когда в них используются физико-механические характеристики материалов, соответствующие реальным режимам работы, в особенности реальным температурным условиям [2-7].

Современные тенденции развития машиностроения ведут к ужесточению и усложнению условий эксплуатации машин, а значит и узлов трения по нагрузкам, скоростям, температурам, воздействиям окружающей среды и т.п., к необходимости снижения материалоемкости. В этой связи исключительное значение приобретают исследования в области триботехнического материаловедения и микро- и нанотрибологии [4, 5], целью которых должна быть разработка научных основ совместимости трибологических материалов, а также составление практических рекомендаций, необходимых для создания износостойких антифрикционных и фрикционных материалов и новых технологий поверхностного упрочнения.

Большой вклад в создание основ материаловедческого подхода изучения процессов трения и изнашивания внесли Н.А. Буше, И.В. Крагельский, П.А. Ребиндер, Л.М. Рыбакова, Д.Н. Гаркунов, Б.И. Костецкий, Л.И. Тушинский и др.[3, 4, 7-9].

В течение длительного времени главным направлением борьбы с изнашиванием было повышение твердости поверхности трения деталей машин. При повышении твердости материала уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, снижается пластическая деформация, действие абразива, а также окислительные процессы [6, 7]. Было

разработано много видов поверхностного упрочнения металлических материалов, такие как цементация, азотирование, нитроцементация, хромирование, поверхностная закалка, наплавка и др. Однако с увеличением нагрузок в узлах трения и повышением требований к КПД традиционные методы повышения износостойкости перестали себя оправдывать, к тому же возможности совершенствования классических диффузионных процессов химико-термической обработки уже исчерпаны. Повышение эффективности таких технологий в настоящее время является актуальной проблемой, которая решается путем разработки комбинированных технологий с применением источников активизации насыщающей среды (различных видов разряда, плазмы, в том числе пульсирующей, низкотемпературной и т.п.) [10], направленных в основном на уменьшение длительности процесса, увеличение толщины упрочненного слоя и твердости, а не на создание специальных структур, устойчивых против износа.

В последние десятилетия во всем мире интенсивно развиваются электрофизические методы поверхностного упрочнения с применением концентрированных потоков энергии (КПЭ) [11-16], различных способов динамической поверхностно-пластической деформации (ППД) [17], в том числе с использованием ультразвукового воздействия [18] и множество других, целью которых, как правило, является повышение поверхностной твердости, износостойкости, в отдельных случаях коррозионной стойкости. Накоплен огромный массив экспериментальных данных по влиянию таких технологий на структуру и свойства для конкретных материалов. Однако анализ источников указывает на *отсутствие четких критериев и системного подхода к целенаправленному научно-обоснованному структурообразованию на поверхности деталей, работающих в конкретных условиях фрикционного взаимодействия*. Зная условия эксплуатации детали, ее ресурс, величину допустимого износа, ряд экономических данных, можно оптимизировать и выбор технологии упрочняющего покрытия, и сам технологический процесс. Решить эту проблему можно только в тесном сотрудничестве между конструкторами и учеными в области материаловедения, механики, физики, химии с одной стороны и технологами, разрабатывающими и реализующими упрочняющие технологии при производстве и ремонте машин с другой. Такое взаимодействие позволит раскрыть новые возможности получения материалов с качественно новыми высокими и сверхвысокими трибологическими свойствами, повысить износостойкость деталей различного функционального назначения. Поэтому цель настоящей работы – на основе анализа и систематизации экспериментальных и теоретических исследований различных ав-

торов и авторов данной статьи структурировать разрозненные в настоящее время исследования, выделить основные направления исследований, чтобы в дальнейшем с учетом знаний процессов изнашивания деформируемых тел и дислокационной теории разрабатывать эффективные против износа технологические процессы поверхностного упрочнения металлов и сплавов.

Обсуждение поставленной проблемы

Процессы, протекающие в поверхностных слоях элементов трибосопряжений при трении

Механическое изнашивание в общем случае описывается как удаление материала с поверхности трения вследствие ее разрушения, проявляющееся в постепенном изменении размеров и формы взаимодействующих тел. При этом имеет место многократно повторяющееся отделение частиц материала с поверхности трения, что указывает на усталостную природу изнашивания [3]. Скорость изнашивания зависит от ее микрогеометрии и истории процесса фрикционного взаимодействия. То есть процесс изнашивания носит наследственный характер с обратной связью, в результате чего возникает самоорганизация и формирование равновесных структур [4].

Авторы работы [19], используя законы механики контактного взаимодействия твердых тел, расчетным путем без учета изменений свойств материалов в процессе трения определяли оптимальную форму рельефа поверхности пары трения. Однако эксперименты показывают, что величина реальных напряжений, возникающих в приповерхностных слоях на глубине до 10...15 мм оказывается на 40...100 % выше расчетных для гладких поверхностей [5].

Поверхности реальных деталей трибосопряжений всегда имеют дефекты, оставшиеся после механической обработки (обточки, шлифования, фрезерования), которые далее развиваются в результате самого фрикционного взаимодействия. В реальных условиях эксплуатации под действием нормальных, касательных и ускоряющих сил, температур трения и окружающей среды, продуктов изнашивания и случайно занесенных в зону трения материалов, а также воздействия погодных условий поверхности трения меняют свою морфологию, что влечет за собой изменение механизмов трения и изнашивания [20]. Область, разделяющую трущиеся тела и ответственную за механизмы трения и интенсивность изнашивания И.В. Крагельский [21] назвал «третьим телом».

Молекулярно-механическая теория трения шероховатых тел, сформулированная в работах И.В. Крагельского [3, 21], рассматривает

адгезионное взаимодействие (молекулярное притяжение поверхностей) трущихся тел. При сжатии под нагрузкой трущиеся поверхности соприкасаются не по всей площади, а лишь на малой ее части - фактической площади контакта. Эта площадь состоит из дискретных участков, по которым реализуется фрикционное взаимодействие тел, так называемые «мостики сварки». Адгезия всегда приводит к увеличению силы трения [22].

В работах [23, 24] обобщены представления о механизмах контактного взаимодействия, учитывающие физическую природу поверхностных явлений. В работе [5] приведена модель образования «третьего тела» между элементами трибосопряжения в процессе эксплуатации на примере наиболее сложного и тяжелонагруженного фрикционного контакта колеса с рельсом (рис. 1). Аналогичные явления характерны и для большинства узлов трения дорожно-строительных машин, гусеничных и колесных транспортных средств [25].

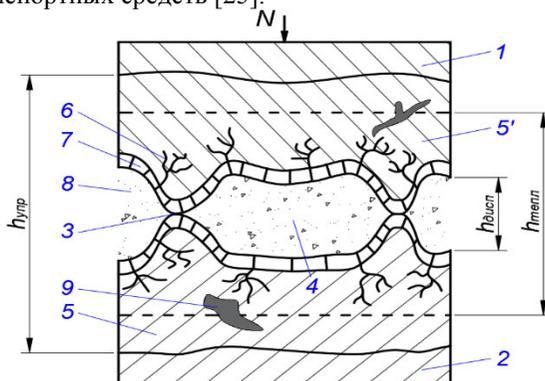


Рис. 1. Модель фрикционного контакта колеса с рельсом:

1- колесо; 2 – рельс; 3 – контакты выступов колеса и рельса; 4 – дисперсный слой продуктов износа и адсорбированных молекул газов и жидкостей ($h_{дисп}$); 5, 5' – участки, подвергнутые деформационному упрочнению и тепловому воздействию ($h_{упр}$ и $h_{тепл}$); 6 – межкристаллитные трещины, возникшие от термических и деформационных напряжений, адсорбции молекул газов и жидкостей, расклинивания и коррозии; 7 – окисные и адсорбированные слои на поверхности колеса и рельса; 8 – окружающая среда (газовая, капельная, пылевидная, абразивная и др.); 9 – флокены, насыщенные водородом в процессе фрикционного взаимодействия элементов трибосопряжения) [5]

Суммарная площадь фактического контакта составляет лишь несколько процентов от номинального [5, 7]. На выступах концентрируются различные по величине сжимающие напряжения. В процессе эксплуа-

тации материал пластически деформируется, неровности сглаживаются, между выступами откладываются продукты износа и другие частицы, заносимые в зону трения. Формируется слой дисперсных загрязнений, обладающий значительной по величине свободной энергией. Под действием тепла трения и адсорбционных процессов происходит окисление материала, на поверхности трения образуются дефекты, в поверхностном слое активно развиваются трещины, внутренняя поверхность которых может в несколько раз превышать площадь поверхности трения и сильно влиять на поверхностную прочность трущихся тел [5].

С точки зрения классического металловедения разрушение вообще и изнашивание в частности, является структурно-чувствительным процессом [26]. Вне зависимости от типа разрушения ему всегда предшествует пластическая деформация, происходящая вследствие движения дислокаций. При движении дислокаций в металле встречаются препятствия в виде включений избыточных фаз, границ зерен, двойников, других дислокаций и т.д. В зонах скопления дислокаций у каких-либо барьеров часто возникают трещины. У барьера краевые дислокации под действием напряжений оказываются настолько тесно прижатыми друг к другу, что их экстраплоскости сливаются, а под ними образуется зародышевая микротрещина. Другой механизм зарождения трещины возможен также при межзеренном скольжении в процессе пластической деформации. Возникшая по тому или иному механизму трещина может быть способна к росту, если величина напряжений в ее устье будет достаточна для раскрытия трещины. В этом случае начинается вторая стадия жизни трещины – стадия ее распространения по сечению детали.

В работе [9] наблюдали процесс изменения дислокационной структуры в зоне фрикционного контакта металлических поверхностей с течением времени (рис. 2). В процессе трения самопроизвольно создаются дислокационные наноструктуры, беспорядочные переплетения дислокаций «леса» (рис. 2 а) сменяются ячеистыми образованиями с рычлыми субграницами (рис. 2 б). Далее активизируется фрагментация структуры и возникают нанокластеры (рис. 2 в, г), с характерной дислокационной неоднородностью. В участках с повышенной плотностью дислокаций образуются микротрещины.

Таким образом, и трибологи, и материаловеды едины в понимании того, что процесс изнашивания имеет усталостную природу [3, 21, 26], а, следовательно, повысить износостойкость материалов можно путем создания такого структурного состояния поверхности, в котором бы сочетались две взаимоисключающие характеристики: высокая прочность (σ_b , σ_T) и трещиностойкость K_{Ic} . Преодолеть это противоречие можно на основе

научного конструирования состава и структуры сплава по показателям не только прочности, но и трещиностойкости с учетом знаний дислокационной теории [8].

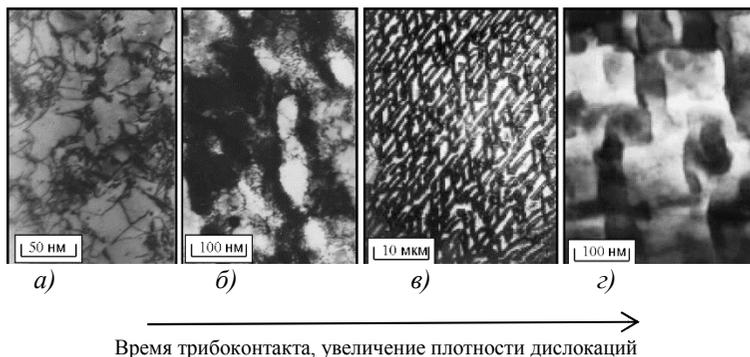


Рис. 2. Изменение дислокационной структуры металлической поверхности в процессе трения [9]

О самоорганизации и совместимости поверхностей трения

Современное трибологическое материаловедение, основателем которого является Н.А. Буше, базируется на изучении материалов с высокой прирабатываемостью и способностью сопротивляться схватыванию, обладающих достаточно высокой прочностью, чтобы не повреждаться вследствие усталостного разрушения в процессе изнашивания. В 70-х годах XX века им было введено понятие совместимости трущихся поверхностей, как способности трущихся пар приспосабливаться друг к другу в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность [27]. В работе [28] проведена оценка совместимости трущихся поверхностей на основе количественных показателей, характеризующих минимальную вероятность задира, минимальную интенсивность изнашивания и максимальную усталостную прочность. Теоретически [29] и экспериментально [30] показано, что повышение легированности материалов трибосистемы приводит к увеличению вероятности прохождения самоорганизации. При легировании, как объемном, так и поверхностном, в каждом конкретном случае руководствуются, прежде всего, требуемыми свойствами материалов. Кроме того, учитываются экономические факторы: стоимость и дефицитность компонентов. Количество возможных комбинаций легирующих элементов практически безгранично, поэтому для обоснованного конструирования упрочненных слоев необхо-

димо прогнозировать влияние на свойства той или иной добавки и обусловленной ею структуры. В присутствии легирующих элементов структурная самоорганизация стальных поверхностей трибосопряжений облегчена, так как сопровождается появлением в зоне фрикционного контакта вторичных структур, способствующих установлению равновесной микро и наногеометрии поверхности и реализации всех механизмов дислокационного упрочнения [8]. Для ускорения самоорганизации пар трения, в которых образование вторичных структур затруднено, авторы работы [31] рекомендуют получать первичные структуры с высокостабильными свойствами, сохраняющимися в процессе эксплуатации. К таким структурам относятся покрытия на основе карбидов, нитридов, боридов и оксидов металлов.

В работе [9] исследована эволюция поверхности в процессе изнашивания на макро, мезо, микро и нано уровнях, показаны оптимальные типы структуры для различных условий трения. Среди них мартенсит и продукты его распада, литая дендритная структура, гетерогенная структура с пластичной основой и твердыми включениями и гетерофазная структура твердого раствора с мелкодисперсными вторичными фазами. В последних двух эффективно реализуется известный принцип Шарпи на микро и нано уровнях соответственно. В таких структурах при трении мягкая пластичная структурная составляющая истирается и основная нагрузка ложится на твердые включения [8, 21]. Аналогичное строение имеют классические антифрикционные сплавы, такие как Б83, БрО10.

Таким образом, анализ научной литературы позволяет наметить пути поиска оптимальных решений по созданию легко прирабатываемых и самоорганизующихся систем технологическими методами. Первое — это рациональное легирование поверхности с целью получения вторичных фаз оптимальной формы и состава; и второе - обоснованный выбор технологического метода и его режимов, способного обеспечить получение гетерогенных структур на мезоуровне и гетерофазных структур на микро и наноуровне уровне.

Технологические пути поверхностного упрочнения деталей трибосопряжений. Прогнозирование и реализация

В последние десятилетия во всем мире интенсивно ведутся исследования возможностей новых электрофизических методов для модифицирования поверхностей различного функционального назначения. Наиболее перспективными для создания гетерогенно-упрочненных поверхностей являются технологии с применением концентрированных потоков энергии (КПЭ), таких как лазерные, плазменные, электронно-лучевые и

др., преимуществом которых является возможность быстро, локально и строго дозированно подавать энергию на поверхность, не вызывая объемных деформаций изделия. Обработка в режиме оплавления открывает широкие возможности легирования поверхности различными элементами или их композициями. Высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют формировать на поверхности неравновесные структуры с высоким уровнем упрочнения [11-16, 32, 33-36]. Изменяя технологические режимы обработки, можно регулировать скорость охлаждения, а следовательно, и структурообразование упрочненного слоя. Так, например, при лазерной обработке, когда скорость охлаждения более 10^6 К/с, формируется упрочненный слой с ультрамелкодисперсной квазинанокристаллической структурой, которая является промежуточной между микрокристаллической и аморфной и обладает высокой износостойкостью с низким (0,16...0,34) коэффициентом трения [36].

Имеются сведения о влиянии на трибологические свойства пары трения коэффициента заполнения поверхности упрочненными зонами и даже формы «пятна». Оптимальный коэффициент заполнения поверхности упрочненными зонами зависит от разницы в твердости между основной и упрочненными участками и составляет 0,3 - 0,6 для мало- и среднеуглеродистых сталей, увеличиваясь до 1,0 для высокоуглеродистых сталей [34]. При этом износостойкость стальной поверхности, упрочненной прямоугольным «пятном» на 23...34 % выше по сравнению с упрочнением круглым «пятном» [35].

Существенным недостатком технологий поверхностного упрочнения с использованием КПЭ является возникновение значительных по величине опасных растягивающих напряжений на границе между зоной термического воздействия и основным металлом [11]. Как правило, эти напряжения устраняют дополнительным нагревом, но при этом достигнутый уровень упрочнения снижается.

В научных публикациях содержится много информации об исследованиях различных способов динамической поверхностно-пластической деформации (ППД), в том числе с использованием ультразвукового воздействия. Существенное повышение износостойкости, в 3 и более раз по сравнению с традиционными технологиями упрочнения, достигается за счет создания гетерогенной поверхности с регулярным рельефом любой сложности [17, 18, 37].

Наиболее перспективным направлением на данном этапе развития инженерии поверхности является разработка комбинированных технологий поверхностного упрочнения, сочетающих воздействие КПЭ, поверхностное ППД и классические диффузионные процессы, такие как

азотирование, нитроцементация, хромирование и др. Такие сложные и затратные процессы могут включать в себя две, три и более технологии [38, 39], поэтому их выбор и последовательность требуют обоснованных технологических решений, обеспечивающих заданные свойства изделия в процессе эксплуатации, что возможно путем расчета ожидаемого структурного состояния, а, следовательно, и уровня упрочнения. Накопленные знания по упрочняющим механизмам на основе дислокационной теории могут успешно применяться технологами при разработке комбинированных технологий.

*Комбинированная технология поверхностного упрочнения,
включающаяся в лазерное легирование с последующим
азотированием*

В монографии [40] описаны теоретические закономерности, связывающие показатели конструкционной прочности с параметрами структуры материалов. В основе современных представлений об упрочнении сплавов лежит дислокационная теория, согласно которой повышение прочности металлических материалов есть следствие взаимодействия дислокаций с препятствиями (дислокациями, элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дисперсными частицами). В книге приведены аналитические соотношения, удобные для практического применения при расчете прогнозируемого упрочнения от реализации различных механизмов упрочнения: дислокационного, субструктурного, зернограничного, твердорастворного, дисперсионного. Физические величины и коэффициенты, необходимые для расчетов, собраны из справочников и научной литературы в таблицы. Сведения о структурных параметрах, необходимые для расчета прогнозируемого упрочнения, таких как плотность дислокаций, размер зерна (субзерна), параметры дисперсных включений (диаметр и расстояние между ними), в современных условиях цифровизации информации доступны практически для любой технологии. На базе этих соотношений предложена методика расчета характеристик упрочнения металлов и сплавов, которая позволяет прогнозировать механические свойства (предел текучести и твердость) в зависимости от структурного состояния сплавов с учетом задействованных упрочняющих механизмов [40, 41].

В качестве примера такого подхода приведем пример поверхностного упрочнения малоуглеродистой стали с использованием технологической комбинации, сочетающей лазерное легирование и азотирование. Известно, что при лазерной обработке стальной поверхности в режиме оплавления в упрочненной зоне за счет ударно-волнового воздействия

плотность дислокаций повышается до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [11, 14]. Для реализации зернограничного механизма упрочнения из литературных источников можно выбрать режимы, при которых формируется ультрамелкозернистая структура. По данным авторов [36] с увеличением скорости перемещения лазерного луча от 0,001 м/с до 10 м/с средний диаметр зерна в стали 40Х уменьшается от 15...20 мкм до 0,1...0,5 мкм. Получить мелкое зерно размером до 2...5 мкм можно с помощью различных модифицирующих добавок, например, порошка V, Cr или Mo [42]. Второй способ предпочтительнее, так как реализуется еще один упрочняющий механизм – механизм твердорастворного упрочнения элементами замещения.

Экспериментальные данные [43, 44] и расчеты дисперсионного упрочнения [45] показывают, что наибольший уровень упрочнения достигается когерентными с матрицей частицами нитридов различных элементов. Поэтому следующий шаг – это азотирование, причем температура и длительность процесса, выбранные по критерию когерентности дисперсных нитридов, составляют 540 °С 3,5 часа.

При совмещении процессов лазерного легирования и азотирования проявляется синергетический эффект, так как, во-первых, нагрев стали с высокой плотностью дислокаций приводит к полигонизации и образованию ячеистой субструктуры, то есть дополнительно включается субструктурный механизм, а во-вторых, при температуре азотирования 540 °С снимаются неблагоприятные растягивающие напряжения, возникшие на границе с основной после лазерного воздействия.

Еще одним важным преимуществом поверхности с нитридным упрочнением является ее высокая теплостойкость (до 600 °С), что актуально для изделий, работающих на высоких скоростях, при повышенных температурах и нагрузках, в то время как мартенситные структуры, получаемые традиционной термообработкой (закалкой и отпуском), распадаются с потерей прочности уже при 250 °С.

Таким образом, комбинация двух взаимодополняющих и повышающих эффективность друг друга технологий, заключающаяся в лазерном легировании (ЛЛ) углеродистых сталей нитридообразующими элементами с последующим азотированием, позволяет задействовать максимально возможное количество упрочняющих механизмов и целенаправленно создать структуру, способную противостоять изнашиванию и усталости.

Суммарный расчетный эффект упрочнения для различных легирующих элементов хорошо согласуется с экспериментальными данными, и, после пересчета предела текучести на микротвердость через коэффициент 0,33 [46] составляет для зон, легированных алюминием с после-

дующим азотированием – 21000 МПа, ванадием - 18500 МПа, хромом - 18000 МПа, молибденом – 12000 МПа.

Трибологические испытания образцов, упрочненных непрерывно действующими дорожками как показано на рисунке 3, в условиях сухого трения показали результаты, представленные в таблице 1.

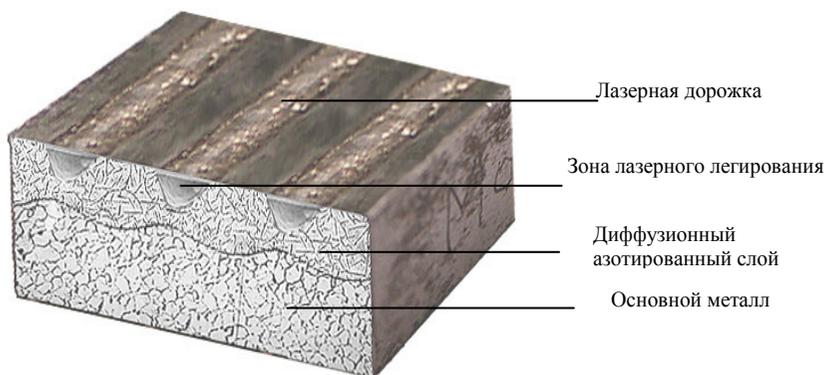


Рис. 3. Формирование упрочненного слоя на стальной поверхности при лазерном легировании с последующим азотированием

Таблица 1. Влияние лазерного легирования и азотирования на трибологические свойства стали 20

Тип легирующего элемента (ЛЭ)	Твердость после ЛЛ, МПа	Твердость после ЛЛ+N, МПа	Износостойкость после ЛЛ, Δm, мг/км	Износостойкость после ЛЛ+ N, Δm, мг/км	Коэффициент трения после ЛЛ	Коэффициент трения после ЛЛ+ N
Без ЛЭ	2500	2600	30	23	0,3	0,26
Al	4000	21000	11	1,2	0,24	0,07
Cr	5800	17000	10	3,8	0,23	0,08
V	5900	18500	8	1,9	0,23	0,16
Mo	8500	11000	6	7,3	0,18	0,06

Из таблицы 1 видно, что лазерное легирование всеми исследуемыми элементами уменьшает износ образцов по сравнению с нормализованной сталью 20 в 2...5 раз в зависимости от типа легирующего элемента. Наибольший износ поверхности наблюдается на образцах, легирован-

ных алюминием, а наименьший – молибденом. Это объясняется, с одной стороны, более высокой твердостью поверхности, легированной молибденом (8500 МПа), а с другой стороны, низким коэффициентом трения за счет образующихся в зоне контакта окислов (вторичных фаз), играющих роль смазки в процессе трения.

Последующее азотирование повышает износостойкость стали 20, легированной ванадием в 15 раз. Легирование алюминием дает еще более высокие триботехнические показатели, однако теплостойкость таких сплавов несколько ниже, по сравнению с другими элементами. Сравнительные испытания на износ нитраллоя 38Х2МЮА, азотированного по аналогичным режимам, показали, что сталь 20 после комбинированной обработки обладает в 1,5...3 раза большей износостойкостью.

Другим важнейшим трибологическим свойством поверхности в процессе трения является усталостная прочность. В работе проводились циклические испытания в условиях многоциклового нагружения с частотой 200 Гц и в условиях малоциклового нагружения с частотой 0,1 Гц с целью определения скорости роста усталостной трещины и порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается. При упрочнении поверхности сталей перекрывающимися лазерными «дорожками» наблюдается нестабильный рост трещины, ускорения которой чередуются с периодическим торможением. Испытания в условиях многоциклового нагружения образцов, подвергнутых лазерной обработке перекрывающимися «дорожками», показали некоторое снижение скорости роста усталостной трещины и увеличение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается по сравнению с нормализованной сталью 20. Последующее азотирование еще больше сдвигает кинетические диаграммы усталостного разрушения вправо, что свидетельствует о повышении трещиностойкости стали примерно в 1,5 раза. Наилучшие результаты при многоцикловом нагружении достигаются легированием молибденом, а при малоцикловом - ванадием и хромом.

Фрактографическими исследованиями установлено, что в изломе сталей, упрочненных по комбинированной технологии ЛЛ+N, наблюдаются вязкие составляющие, тогда как после лазерного легирования изломы стали 20 имеют явно выраженный хрупкий характер, что обусловлено значительным вкладом дислокационного механизма в общий уровень упрочнения. При лазерном легировании и последующем азотировании на поверхности стали формируется структура, упрочненная дисперсными частицами нитридов легирующих элементов, затрудняющая зарождение трещины и способствующая эффективному её торможению, особенно на ран-

ней стадии роста, а вклад дислокационного механизма упрочнения существенно уменьшается.

Заключение

1. Явления, протекающие в приповерхностных слоях трибосопряжения:

- при нагреве в процессе трения ускоряются окислительные реакции, адсорбция элементов из окружающей среды, электризация и другие физико-химические процессы;

- в зоне фрикционного контакта происходит пластическая деформация, увеличивается плотность дислокаций, что приводит к некоторому упрочнению металла;

- в участках с критическим скоплением дислокаций образуются субмикротрещины, развиваясь, они формируют разветвленную систему трещин, что приводит к усталостному разрушению.

2. Повышение износостойкости материалов трибосопряжений, работающих в условиях сухого трения, достигается за счет создания диссипативных структур, способных к эффективному рассеянию тепловой энергии и к структурной самоорганизации в процессе трения.

3. Необходимыми условиями структурной самоорганизации поверхностей трения являются:

- обоснованное легирование компонентами, способствующими образованию вторичных фаз;

- создание на поверхности стабильных первичных структур, сохраняющихся в процессе эксплуатации, таких как нитриды, бориды, карбиды и т.п. различными технологическими методами;

- создание гетерогенных структур с регулярным микрорельефом поверхностей, реализующих принцип Шарпи на мезо, микро и наноуровне.

4. Дальнейшее развитие триботехнического материаловедения связывается, прежде всего, с разработкой комбинированных технологий, сочетающих такие методы поверхностного упрочнения, которые позволяют задействовать наиболее благоприятные и эффективные механизмы упрочнения с точки зрения повышения характеристик прочности и трещиностойкости (зернограницный, субструктурный, твердорастворный и дисперсионный).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джост, П. Трибология – рождение понятия // Трение и износ. - 2006. - Т.27. - № 2. - С. 129-131.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.] под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
3. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
4. Буше, Н.А. Триботехнические материалы. Практическая трибология: в 2 Т. Т.1. - М., 1994. - с.15-21.
5. Лужнов, Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. - М.: Интекст, 2009. - 176 с.
6. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
7. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безопасность.- М.: МСХА, 2001.- 614 с.
8. Тушинский, Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 306 с.
9. Материаловедение в трибологии / Л.И. Тушинский [и др.] // Научный вестник НГТУ. – 2010. - № 2(39). - С. 145-156.
10. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей: монография / Л.Г. Петрова, В.А. Александров, П.Е. Демин, [и др.], под ред. Л.Г. Петровой. – М.: МАДИ, 2019. – 180 с.
11. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. - М. : Машиностроение, 1985. - 496 с.
12. Балановский, А.Е. Особенности структурообразования в сталях при плазменном упрочнении.- Иркутск: ИрГТУ, 2014. - 450 с.
13. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А.В. Белый, А.С. Калиниченко, О.Г. Девойно, В.А. Кукареко. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 457 с.
14. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки./ А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 664 с.
15. Наноструктурирование стали плазменной дугой / В.А. Коротков, С.П. Ананьев, В.Я. Шур, Е.И. Шишкин // Технология машиностроения. - 2011 - № 4. - С. 1-5.
16. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая закалка поверхности металлов. - Сварщик, 1999. - №3. - с.14-15.
17. Повышение надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / М.А. Тамаркин, Д.В. Казаков, А.С. Шведова, Р.В. Гребенкин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2015. - № 8. - с. 23-27.
18. Чудина, О.В., Применение принципов структурной теории прочности при разработке технологий поверхностного упрочнения, сочетающих закалку ТВЧ и

- ультразвуковое ППД / О.В. Чудина, В.М. Приходько // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. - №5. - с. 27-31.
19. Горячева, И.Г. Моделирование изнашивания деформируемых тел на разных масштабных уровнях // Физическая мезомеханика. - 2007. - Т. 10. - № 5. - С. 31-39.
20. Лужнов, Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности./ Ю.М. Лужнов. - М.: Интекс, 2003. - 144 с.
21. Крагельский, И.В. Трение и износ. – изд. 2-е перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
22. Горячева, И.Г. Итоги развития молекулярно-механической теории трения/ И.Г. Горячева, М.Н. Добычин // Трение и износ. - 2008. - Т. 8. - № 4. - С. 327-337.
23. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения / И.Г. Горячева, С.М. Захаров, А.Я. Коган, [и др.] // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». - 2017. - № 5-6. - С. 16-26.
24. Контактное взаимодействие в прецизионных трибосистемах / Н.К.Мышкин [и др.] // Трение и износ. - 2020. - № 3. - Т.41. - С. 263-271.
25. Чудина, О.В. Конструкционные материалы для транспортных средств специального назначения: учеб. пособие / О.В.Чудина, М.П. Малиновский. – М.: МАДИ, 2020. – 232 с.
26. Коган, Я.Д. Разрушение материалов в эксплуатации. Физика отказов деталей машин. – М.: МАДИ, 1982. – 84с.
27. Буше Н.А. Совместимость трущихся поверхностей/ Н.А. Буше, В.В. Копытско. - М.: Наука, 1981. 126 с.
28. Буше, Н.А. Об исследованиях в области оценки совместимости трущихся пар/ Н.А. Буше // Проблемы трения и изнашивания. - 1971. - № 1. - С.17-21.
29. SelfOrganization During Friction in Complex Surface Engineered Tribosystems / G.S. FoxRabinovich [& oth.] // Entropy. - 2010. - 12. - p. 275-288.
30. Костецкий, Б.И. Управление изнашиванием машин / Б.И. Костецкий. – Киев: О-во «Знание» УССР, 1984. – 20 с.
31. Описание процессов трибосистем и разработка износостойких материалов с использованием неравновесной термодинамики и теории самоорганизации/ Гершман И.С. [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. - 2016. - Т.75. - № 5. - С. 271-277.
32. Бржозовский, Б.М. Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - № 5 (149). - С. 213-217.
33. Chudina, O.V. Surface Alloying of carbon tool steels using laser heating / O.V. Chudina, A.A. Brezhnev // Russian Metallurgy (Metally). - Vol. 2015. - No. 13. - P. 1090-1093
34. Влияние степени дискретной лазерной обработки на износостойкость сталей и сплавов / С.Д. Кузьмин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2016.- № 9. - С. 9 - 14.
35. Определение влияния режимов лазерного упрочнения на геометрические параметры зон закалки и их трибологические характеристики / В.П. Бирюков [и др.] // Научные труды VI Международной конференции «Фундаментальные ис-

следования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН, 2019. – С. 55-57.

36. Кондратьев, С.Ю. Получение износостойкого квазинаноструктурного поверхностного слоя в сталях и цветных сплавах лазерной обработкой / С.Ю. Кондратьев, В.О. Попов // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2011. - № 2. - С. 22-28.

37. Киричек, А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. - 2007. - №12. - С. 28-31.

38. Рахимьянов, Х.М. Прогнозирование состояния поверхностного слоя при комбинированном поверхностном упрочнении деталей машин / Х.М. Рахимьянов, Ю.В.Никитин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2010. - № 10 (70). - С. 43-48.

39. Перевалова, О.Б. Особенности поверхностного упрочнения 12Сг ферритно-мартенситной стали при совмещении ионно-плазменного азотирования и ультразвуковой обработки / О.Б. Перевалова, А.В. Панин, Е.А. Синякова // Физика и химия обработки материалов. - 2012. - № 3. - С. 43-50.

40. Приходько, В.М. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий / В.М. Приходько, Л.Г. Петрова, О.В. Чудина. - М.:Машиностроение, 2003. - 384 с.

41. Chudina, O.V. Methodology of control of structure formation for development of hardening processes / O.V. Chudina, L.G. Petrova // Metal Science and Heat Treatment.- 2010.- Vol.52. - No. - 5-6. - P. 219-228.

42. Chudina, O.V Modification of Steel Surface Using the Laser Energy / O.VChudina // Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2014, Vol. 4, 181-188.

43. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

44. Лахтин, Ю.М., Структура и прочность азотированных сплавов. (Достижения отечественного металловедения) / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. - М.: Металлургия, 1982. - 176 с.

45. Чудина, О.В. Сравнение дисперсионного упрочнения когерентными и некогерентными нитридами при азотировании сплавов на основе железа, никеля и кобальта / О.В.Чудина, Л.Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2000. - № 5. - С. 26-31.

46. Матюнин, В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов / Матюнин В.М. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ АЗОТИРОВАНИЕМ

Ю.М. Лужнов¹, д-р техн. наук, профессор

О.В. Чудина¹, д-р техн. наук, профессор

А.В. Соколов², канд. техн. наук

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

²Ярославский государственный технический университет

В работе исследовано влияние модифицирования поверхности лазерным легированием и азотированием на трибологические свойства малоуглеродистых сталей. Показано, что поверхностное лазерное легирование сталей нитридообразующими элементами с последующим азотированием позволяет реализовать максимальное количество упрочняющих механизмов и целенаправленно создать структуру, способную эффективно противостоять изнашиванию и усталости.

Микротвердость азотированного слоя, предварительно легированного алюминием, составляет 21000 МПа, ванадием - 18500 МПа, хромом - 17000 МПа, молибденом - 11000 МПа. Теплостойкость упрочненного слоя более 600°C, причем нагрев стали с модифицированной поверхностью приводит к еще большему повышению твердости за счет выделения дисперсных частиц оптимальной степени когерентности.

Показано, что износостойкость стали 20 после комбинированной обработки в 15 раз выше, чем износостойкость нормализованной стали 20, и в 1,5...3 раза выше, чем износостойкость азотированного нитралля 38Х2МЮА. Повышение износостойкости объясняется высокой твердостью поверхностного слоя и формированием рельефа поверхности по типу Шарпи, что снижает коэффициент трения.

Испытания на трещиностойкость при много- и малоцикловом нагружении образцов из стали 20 показали снижение скорости роста усталостной трещины в 1,5 раза и увеличение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается. Фрактографические исследования изломов показали, что стали после лазерного легирования разрушаются по хрупкому механизму, в то время как в изломах сталей, упрочненных по комбинированной технологии, наблюдаются вязкие составляющие, что объясняется наличием в структуре дисперсных частиц нитридов легирующих элементов, затрудняющих зарождение трещины и способствующих эффективному её

торможению, особенно на ранней стадии роста.

Ключевые слова: лазерное легирование, азотирование, модифицирование поверхности, структура, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, трещиностойкость

INCREASING THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STEELS AFTER SURFACE MODIFICATION BY LASER ALLOYING FOLLOWED BY NITRIDING

Yu.M. Luzhnov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

O.V. Chudina¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

A.V. Sokolov², Candidate of Technical Sciences

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

²Yaroslavl State Technical University

The paper investigates the effect of surface modification by laser alloying and nitriding on the tribological properties of low-carbon steels. It is shown that surface laser alloying of steels with nitride-forming elements followed by nitriding allows you to realize the maximum number of strengthening mechanisms and purposefully create a structure that can effectively resist wear and fatigue.

The microhardness of the nitrided layer pre-alloyed with aluminum is 21000 MPa, vanadium - 18500 MPa, chromium - 17000 MPa, molybdenum - 11000 MPa. The heat resistance of the hardened layer is more than 600 ° C, and heating of steel with a modified surface leads to an even greater increase in hardness due to the release of dispersed particles of the optimal degree of coherence.

It is shown that the wear resistance of steel 20 after combined treatment is 15 times higher than that of normalized steel 20, and 1.5 ... 3 times higher than the wear resistance of nitrided alloy 38CrMoAl. The increase in wear resistance is due to the high hardness of the surface layer and the formation of a Charpy-type surface relief, which reduces the coefficient of friction.

Tests for crack resistance under high- and low-cycle loading of specimens made of steel 20 showed a 1.5-fold decrease in the growth rate of a fatigue crack and an increase in the threshold value of the stress intensity factor below which the crack does not develop. Fractographic studies of fractures have shown that steels after laser alloying are destroyed by a brittle mechanism, while in fractures of steels hardened by the combined technology, viscous components are observed, which is explained by the presence in the structure of dispersed particles of nitrides of alloying elements that impede crack initiation and contribute to its effective inhibition. especially in the early stages of growth.

Keywords: laser alloying, nitriding, surface modification, structure, microhardness, wear resistance, coefficient of friction, crack resistance

Введение

Трибологические свойства деталей машин определяются с одной стороны оптимизацией конструкции узлов трения и условий их эксплуатации, с другой стороны рациональным выбором материалов и способа обработки с целью придания им требуемой конструкционной прочности.

Под конструкционной прочностью понимается комплекс механических свойств, находящихся в наибольшей корреляции с эксплуатационной прочностью изделия или конструкции. Для оценки конструкционной прочности большинства изделий используются такие понятия, как надежность и долговечность. Критериями оценки надежности металлических материалов являются ударная вязкость, вязкость разрушения (живучесть, критическое раскрытие трещины и др.). Критериями оценки долговечности являются усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость, сопротивление коррозии, ползучесть и т.д.

Усталостная прочность является важной характеристикой конструкционной прочности, так как 80 % всех разрушений носят усталостный характер. Многие детали машин (оси, валы и т.д.) работают в условиях знакопеременных (циклических) нагрузок на изгиб и кручение, при которых максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях, где сосредоточены концентраторы напряжений. Чувствительность к концентраторам напряжений резко снижается, а предел выносливости возрастает при создании на поверхности остаточных напряжений сжатия путем упрочнения химико-термической или другой обработкой [1].

Контактная выносливость (усталостное изнашивание) является причиной отказа многих изделий (тяжело нагруженные зубчатые и червячные передачи, подшипники качения, рельсы, колеса и т.д.). Процесс разрушения заключается в зарождении усталостной трещины, как правило, на поверхности и постепенном ее развитии вглубь изделия.

Из рассмотренного выше следует, что прочность конструкции определяется комплексом механических свойств материала, технологией упрочнения, а также характером самой конструкции и условиями эксплуатации.

Все рассмотренные характеристики структурно-чувствительны, и поэтому путь повышения эксплуатационных свойств связывают с разработкой таких упрочняющих технологий, которые привели бы к созданию оптимальных структур сплавов, обеспечивающих требуемый уровень надежности и долговечности конструкций. Формирование оптимального структурного состояния металлических материалов, обеспечивающего высокий уровень надежности и долговечности изделий, наиболее полно реализуется на основе применения принципов дислокационной теории

упрочнения [2].

Анализ существующих дислокационных теорий прочности и механизмов упрочнения показал, что основными механизмами упрочнения, обеспечивающими повышение напряжения пластического течения, являются упрочнение растворенными атомами внедрения или замещения, дислокациями, границами зерен и субзерен, дисперсными частицами. Упрочнение реальных металлов определяется совокупным действием всех или некоторых из перечисленных механизмов [2]:

$$\sigma_T = \Sigma \sigma_i = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{т.р.}} + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_{\text{д.у.}} \quad (1)$$

где σ_0 - напряжение трения кристаллической решетки (сила Пайерлса-Набарро); $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ - прирост предела текучести за счет твердорастворного упрочнения; $\Delta\sigma_d$ - прирост предела текучести за счет дислокационного (деформационного) упрочнения; $\Delta\sigma_z$ - прирост предела текучести за счет зернограницного упрочнения; $\Delta\sigma_c$ - прирост предела текучести за счет субструктурного упрочнения; $\Delta\sigma_{\text{д.у.}}$ - прирост предела текучести за счет дисперсионного упрочнения.

Анализ влияния структурных факторов на характеристики конструкционной прочности показал, что наиболее благоприятными механизмами, обеспечивающими сочетание высокой прочности с достаточным запасом пластичности, являются зернограницное упрочнение σ_z , твердорастворное упрочнение $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ (если легирующие элементы измельчают зерно) и субструктурное упрочнение σ_c . Увеличение плотности неорганизованных дислокаций (σ_d), повышая прочность, в наибольшей степени снижает вязкость разрушения. Дисперсионное упрочнение ($\sigma_{\text{д.у.}}$) эффективно повышает прочностные характеристики, при этом отрицательное влияние частиц на характеристики вязкости разрушения можно минимизировать путем регулирования параметров структуры технологическими методами.

На основе реализации тех или иных механизмов упрочнения путем целенаправленного формирования структуры можно получить требуемые характеристики конструкционной прочности для деталей, работающих в конкретных условиях эксплуатации. Используя различные технологические комбинации, можно задействовать максимальное количество упрочняющих механизмов и формировать структуру с высокими и сверхвысокими физико-механическими свойствами [3]. В таблице 1 приведены технологические пути реализации основных упрочняющих механизмов.

Таблица 1. Основные упрочняющие механизмы и технологические пути их реализации

№ п/п	Механизм упрочнения	Структурный параметр	Технологические пути реализации
1	Дислокационный	Плотность дислокаций ρ , см ² , $\Delta\sigma_d = f(\rho)$	Пластическое деформирование, в особенности с применением ультразвука, закалка на мартенсит, лазерная термическая и химико-термическая обработка
2	Твердорастворный – элементами замещения или элементами внедрения	Концентрация элемента С, % $\Delta\sigma_{т.р.} = f(C)$	1. Объемное легирование в процессе выплавки; поверхностное лазерное легирование; 2. ХТО: азотирование, цементация, нитроцементация; создание азотсодержащих сталей
3	Зернограничный	Размер зерна d_3 , мкм $\Delta\sigma_3 = f(d_3)$	Микролегирование нитридо- и карбидообразующими элементами; пластическая деформация с последующей рекристаллизацией, лазерная обработка с оплавлением
4	Субструктурный	Размер субзерна или ячейки, l , мкм $\Delta\sigma_{с/я} = f(l)$	Пластическое деформирование с $\epsilon \geq 15-20$ %, в особенности с применением ультразвука и при термомеханической обработке, лазерная обработка с высокой плотностью мощности излучения
5	Дисперсионный: 1. Когерентными частицами 2. Некогерентными частицами	1. Для когерентных частиц объемная доля f , $\Delta\sigma_{д.у.} = f(f)$; 2. Для некогерентных частиц размер частиц D и расстояние между ними λ , $\Delta\sigma_{д.у.} = f(\lambda, D)$	1. Создание дисперсионно-твердеющих сплавов, упрочняемых старением; 2. Азотирование, цементация, окисление; создание композиционных материалов методом порошковой металлургии
6	Микронапряжения	Относительное изменение параметра решетки $\Delta a/a$, $\Delta\sigma_n = f(\Delta a/a)$	Пластическое деформирование, лазерная термическая и химико-термическая обработка

Составлено авторами

Анализ современных методов упрочнения показывает, что наи-

большее количество упрочняющих механизмов задействовано при лазерной обработке с оплавлением поверхности. Это дислокационный, твердорастворный, зернограничный и субструктурный механизмы. Однако расчеты [4], показывают, что наибольший вклад в общий уровень упрочнения вносит дисперсионный механизм, в особенности когерентными с матрицей частицами нитридов легирующих элементов. Такой механизм можно реализовать азотированием, если предварительно провести лазерное легирование нитридообразующими элементами.

Одновременно, нагрев при азотировании до температуры 540 °С снимает неблагоприятные растягивающие напряжения, возникающие на границе с основной после лазерного воздействия, приводит к полигонизации дислокаций с образованием ячеистой субструктуры и, в отличие от других видов химико-термической обработки, не приводит к существенным деформациям изделия, сохраняя структуру сердцевины без изменений.

Важным преимуществом поверхности с нитридным упрочнением является ее высокая теплостойкость (до 600 °С), что актуально для изделий, работающих при повышенных температурах или в условиях изнашивания на высоких скоростях. Мартенситные структуры, получаемые при традиционной термообработке (закалке и отпуске), распадаются с потерей прочности уже при 250 °С.

Таким образом, комбинация двух взаимодополняющих и повышающих эффективность друг друга технологий, заключающаяся в лазерном легировании (ЛЛ) углеродистых сталей нитридообразующими элементами с последующим азотированием, позволяет задействовать максимально возможное количество упрочняющих механизмов и целенаправленно создать структуру, способную эффективно противостоять изнашиванию и усталости.

Целью работы является исследование влияния лазерного легирования поверхности нитридообразующими элементами и последующего азотирования на структуру, твердость, износостойкость и трещиностойкость конструкционных сталей.

Материалы и методы

Обработке подвергали углеродистые конструкционные стали элементами V, Cr, Mo, Al и др. с использованием лазерного излучения как в импульсном режиме на установке «Квант-16» с мощностью излучения 24 Дж, так и в непрерывном режиме на установке ЛОК-2М с мощностью 1 кВт при скорости перемещения луча от 2 до 30 мм/с из обмазки, состоящей из порошка насыщающего элемента и органического связующе-

го. Легирование проводили как с перекрытием зон лазерного воздействия, так и с 50 %-м заполнением поверхности. Азотирование проводили в атмосфере аммиака при температуре 540...570 °С в течение 3...6 часов. Металлографические исследования проводили на микроскопе НЕОРНОТ-21 с увеличением до $\times 1500$. Концентрацию и распределение легирующих элементов и азота в упрочненной зоне исследовали на микрорентгеноспектральном анализаторе «Link-system», а фазовый состав - на установке ДРОН-3. Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3. Испытания на износостойкость проводили на установке для исследования трибологических свойств по схеме «ролик-колодка» в условиях сухого трения с определением стабилизированного коэффициента трения. Испытания на трещиностойкость при малоцикловом нагружении проводились на установке ЗД-10, а при многоцикловом – на установке УРС-20/30000 конструкции Сибирского металлургического института. Фрактографические исследования проводили на электронном микроскопе «Jeol-U3».

Результаты

С целью реализации максимально возможного числа упрочняющих механизмов при выборе материала матрицы, типа легирующих элементов и технологических параметров лазерного легирования и последующего азотирования необходимо, чтобы легирующие элементы были нитридообразующими, обладали высоким сродством к азоту, увеличивали растворимость азота в феррите. С учетом этих требований в качестве легирующих элементов выбраны V, Cr, Mo и Al. Оптимальная концентрация их в зоне легирования определялась в зависимости от способности влиять на растворимость азота в феррите и от способности к равномерному распределению в железной матрице при лазерном легировании (рис. 1).

Толщина легированной зоны определяется максимально возможной толщиной азотированного слоя, которая в большинстве случаев для легированных сталей не превышает 600 мкм (рис. 2).

В качестве матричного материала предпочтительны стали с содержанием углерода 0,2-0,3 %. При большем содержании углерода эффективность комбинированной технологии несколько снижается, так как легирующие элементы частично связываются в карбиды, некогерентные с ферритной матрицей и в образовании нитридов участия не принимают.

Металлографическим, рентгеноструктурным и микрорентгеноспектральным анализом установлено, что при оптимальных технологических режимах в зоне лазерного легирования ванадием, хромом и алюми-

нием формируется структура легированного феррита с чрезвычайно мелким зерном 2...5 мкм (рис. 3), что приводит к увеличению микротвердости примерно до 6000 МПа. При легировании молибденом в структуре возможно выделение интерметаллидных фаз, повышающих микротвердость упрочненного слоя до 8500 МПа. После азотирования при $T=540$ °С в течение 3 часов лазернолегированной поверхности V, Cr и Mo, в упрочненном слое формируется, как правило, однофазная структура α -твердого раствора, легированного азотом, без включений частиц нитридов.

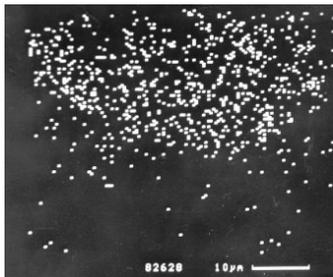


Рис. 1. Распределение ванадия в зоне лазерного легирования



Рис. 2. Микроструктура стали 20 после лазерного легирования хромом, x100

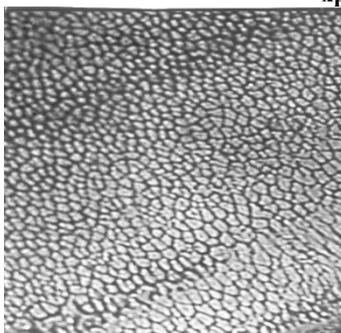


Рис. 3. Микроструктура стали 20 после лазерного легирования хромом, x1000
Рис. 1,2,3 - Составлены авторами

В зонах, легированных Al, образуется двухфазная структура $\alpha + \gamma'$ - фаза $(Fe,Al)_4N$. Такая обработка обеспечивает существенное повышение микротвердости: ЛЛ(Al) + N до 21000 МПа, ЛЛ(V) + N до 18500 МПа, ЛЛ(Cr) + N до 17000 МПа, ЛЛ(Mo)+N до 11000 МПа. Повышение

твердости объясняется тем, что после азотирования дополнительно включается механизм твердорастворного упрочнения азотом. При азотировании сталей, лазернолегированных алюминием микротвердость максимальна, так как в этом случае механизм повышения прочности сочетает в себе компоненты как твердорастворного, так и дисперсионного упрочнения γ' -фазой $(Fe,Al)_4N$.

Увеличение продолжительности процесса азотирования до 6 часов или проведение старения приводит к выделению нитридов легирующих элементов полностью или частично когерентных с матрицей и, как следствие, к дополнительному повышению твердости (рис. 4). Экспериментально установлено, что максимальный уровень упрочнения достигается после старения при температуре 250 °С в течение 1 ч за счет выделения дисперсных частиц оптимальной степени когерентности.

Расчеты показывают, что наиболее существенный вклад вносят два механизма: твердорастворный - азотом и дисперсионный - частицами нитридов легирующих элементов. Вклад твердорастворного упрочнения азотом особенно высок в сплавах Fe-Cr, что объясняется сильным влиянием хрома на повышение растворимости азота в феррите.

Доля твердорастворного упрочнения легирующим элементом очень незначительна: не более 5 %. Зернограничное упрочнение значительнее в сплавах Fe-Mo (7...10 %) по сравнению с другими сплавами, что объясняется более мелкозернистой структурой. Вклад дислокационного упрочнения, также, как и зернограничного, существенно уменьшается после азотирования до 1...6 %.

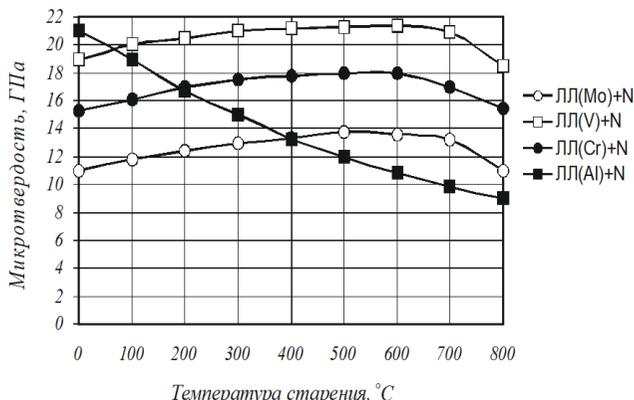


Рис. 4. Влияние температуры старения на микротвердость модифицированной поверхности стали 20 (длительность выдержки 30 мин)
Составлено авторами

К основным триботехническим показателям относят твердость, износостойкость, антифрикционность, фрикционную теплостойкость, прирабатываемость и др., которые в значительной степени зависят от химического состава и структуры поверхностных слоев металлов. [5]

В таблице 2 представлены результаты испытаний на износостойкость стали 20, поверхность которой была подвергнута лазерному легированию (ЛЛ) различными элементами и комбинированной обработке, заключающейся в лазерном легировании с последующим азотированием. Видно, что лазерное легирование всеми исследуемыми элементами уменьшает износ образцов по сравнению с нормализованной сталью 20 в 2...5 раз в зависимости от типа легирующего элемента. Наибольший износ поверхности наблюдается на образцах, легированных алюминием, а наименьший – молибденом. Это объясняется, с одной стороны, более высокой твердостью поверхности, легированной молибденом (8500 МПа), а с другой стороны, низким коэффициентом трения за счет образующихся в зоне контакта оксидов железа, играющих роль смазки в процессе трения.

Последующее азотирование повышает износостойкость стали 20, легированной ванадием в 15 раз. Легирование алюминием дает еще более высокие триботехнические показатели, однако теплостойкость таких слоев несколько ниже, по сравнению с другими элементами (рис. 4).

Сравнительные испытания на износ нитраллоя 38Х2МЮА, азотированного по аналогичным режимам, показали, что сталь 20 после комбинированной обработки обладает в 1,5...3 раза большей износостойкостью.

Большое влияние на трибологические свойства сталей оказывает степень заполнения поверхности упрочненными зонами. Наилучшие характеристики износостойкости на этапе приработки достигаются при 50%-ном заполнении поверхности зонами легирования, так как при лазерной обработке формируется структура по типу Шарпи: мягкая основа – твердые включения, когда в процессе трения мягкая основа истирается и контакт трущихся поверхностей идет по вершинам твердых включений, снижая коэффициент трения. При 100%-ном упрочнении поверхности, когда зоны лазерного легирования перекрывают друг друга на 5–10 %, сопротивление износу выше на втором участке кривой износа при так называемом окислительном изнашивании. Полностью притертая поверхность также представляет собой чередование упрочненных и неупрочненных зон вследствие снижения твердости в зонах перекрытия, в том числе, и из-за повторного нагрева при лазерной обработке.

Таблица 2. Влияние лазерного легирования и азотирования на трибологические характеристики стали 20

Тип легирующего элемента (ЛЭ)	Твердость после ЛЛ, МПА	Твердость после ЛЛ+N, МПа	Износостойкость после ЛЛ, Δm , мг/км	Износостойкость после ЛЛ+N, Δm , мг/км	Коэффициент трения после ЛЛ	Коэффициент трения после ЛЛ+N
Без ЛЭ	2500	2600	30	23	0,3	0,26
Al	4000	21000	11	1,2	0,24	0,07
Cr	5800	17000	10	3,8	0,23	0,08
V	5900	18500	8	1,9	0,23	0,16
Mo	8500	11000	6	7,3	0,18	0,06

Источник: Составлено авторами.

Другим важнейшим трибологическим свойством поверхности в процессе трения является усталостная прочность. В работе проводились циклические испытания в условиях многоциклового нагружения с частотой 200 Гц и в условиях малоциклового нагружения с частотой 0,1 Гц с целью определения скорости роста усталостной трещины и порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается.

Испытания в условиях многоциклового нагружения образцов, подвергнутых лазерной обработке перекрывающимися «дорожками», показали некоторое снижение скорости роста усталостной трещины и увеличение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается по сравнению с нормализованной сталью 20. Последующее азотирование еще больше сдвигает кинетические диаграммы усталостного разрушения вправо и свидетельствует о повышении трещиностойкости стали примерно в 1,5 раза.

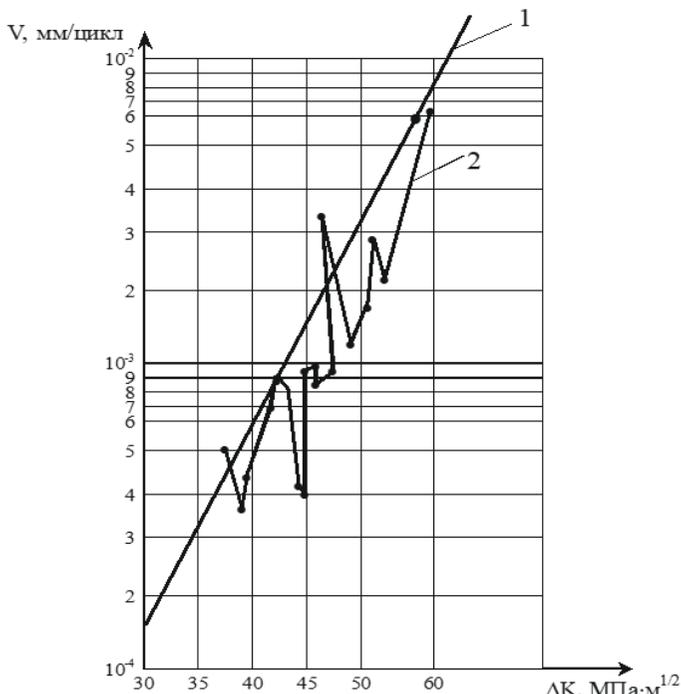


Рис. 5. Кинетические диаграммы усталостного разрушения при циклическом нагружении с частотой 0,1 Гц стали 20 после: 1 - нормализации; 2 - ЛЛ(V)+N, лазерные дорожки нанесены без перекрытия
Составлено авторами

Испытания в условиях малоциклового нагружения частотой 0,1 Гц при нанесении на стальную поверхность лазерных «дорожек» с перекрытием скорость роста усталостной трещины увеличивается. Последующее азотирование улучшает эту характеристику до уровня исходного образца. При нанесении лазерных «дорожек» без перекрытия с последующим азотированием трещиностойкость малоуглеродистых сталей увеличивается в 1,5 раза. Кинетические диаграммы в этом случае имеют непривычный вид (рис. 5), который, однако, полностью отвечает внутренним механизмам усталостного разрушения таких гетерофазных образцов. Наблюдается нестабильный рост трещины, ускорения которой чередуются с периодическим торможением.

Фрактографическими исследованиями установлено, что в изломе

сталей, упрочненных по комбинированной технологии, наблюдаются вязкие составляющие (рис. 6,б), тогда как после лазерного легирования изломы стали 20 имеют явно выраженный хрупкий характер (рис. 6,а), что обусловлено значительным вкладом дислокационного механизма в общий уровень упрочнения. После азотирования на поверхности формируется структура, упрочненная дисперсными частицами нитридов легирующих элементов, затрудняющими зарождение трещины и способствующими эффективному её торможению, особенно на ранней стадии роста, а вклад дислокационного механизма упрочнения существенно уменьшается.

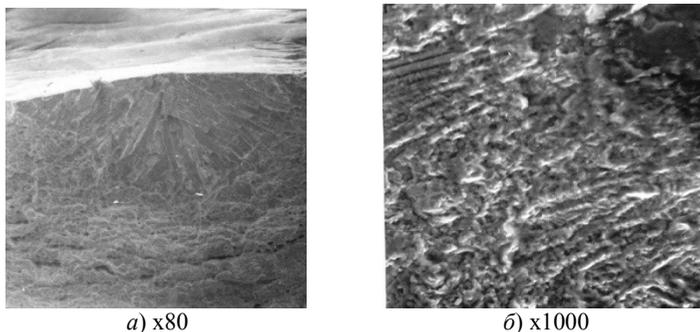


Рис. 6. Фрактограммы усталостного разрушения стали 20 после:
а -ЛЛ(V) и б- ЛЛ(V)+N.
Составлено авторами

Обсуждение

Проведенные исследования влияния параметров лазерного легирования позволили установить оптимальные технологические режимы как импульсного, так и непрерывного излучения, при которых удовлетворяются перечисленные выше требования.

Роль дисперсионного упрочнения при комбинированной обработке – максимальна. Она тем больше, чем выше термодинамическая стабильность нитрида (в ряду $\text{Mo}_2\text{N} \rightarrow \text{Cr}_2\text{N} \rightarrow \text{VN}$), при упрочнении нитридами ванадия его вклад достигает 83 %. Причем уровень упрочнения когерентными частицами существенно выше, чем некогерентными.

Поэтому для достижения максимального уровня упрочнения следует обеспечить формирование структуры с дисперсными частицами нитридов легирующих элементов, находящихся в оптимальной степени когерентности с матрицей, что регулируется путем оптимизации техно-

логических параметров комбинированной обработки на каждой ее стадии. Комбинированная обработка позволяет повысить показатели конструкционной прочности.

Наилучшие результаты при многоцикловом нагружении достигаются легированием молибденом, а при малоцикловом - ванадием и хромом.

На основе экспериментальных исследований влияния режимов каждого этапа комбинированного технологического процесса структуру и микротвердость, а также на основе результатов испытаний на износостойкость и трещиностойкость определены технологические режимы, которые позволяют повысить в 1,5-1,8 раза срок службы изделий, работающих в условиях интенсивного изнашивания, динамических и циклических нагрузок при повышенных температурах (валы, шестерни инструмент, матрицы, пуансоны для холодного и горячего деформирования, шпиндели опор качения, ходовые винты, гильзы, детали суппортной группы и т.д.).

Заключение

1. Предложена комбинация двух взаимодополняющих и повышающих эффективность друг друга технологий, заключающаяся в лазерном легировании углеродистых сталей нитридообразующими элементами с последующим азотированием, которая позволяет реализовать максимальное количество упрочняющих механизмов и целенаправленно создать структуру, способную эффективно противостоять изнашиванию и усталости.

2. Микротвердость модифицированного слоя после ЛЛ(Al) + N- 21000 МПа, ЛЛ(V) + N- 18500 МПа, ЛЛ(Cr) + N- 17000 МПа; ЛЛ(Mo)+N- 11000 МПа.

3. Теплостойкость модифицированной поверхности - более 600°C. Нагрев стали с модифицированной поверхностью приводит к еще большему повышению твердости за счет выделения дисперсных частиц оптимальной степени когерентности.

4. Показано, что износостойкость стали 20 после комбинированной обработки в 15 раз выше, чем износостойкость нормализованной стали 20, и в 1,5...3 раза выше, чем износостойкость азотированного нитралля 38X2MЮА. Повышение износостойкости объясняется высокой твердостью поверхностного слоя и формированием рельефа поверхности по типу Шарпи, что снижает коэффициент трения.

5. Испытания на трещиностойкость при многоцикловом нагружении образцов из стали 20, поверхность которых модифицирована пере-

крывающимися «дорожками» и азотированием, показали снижение скорости роста усталостной трещины в 1,5 раза и увеличение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого трещина не развивается.

6. Испытания при малоцикловом нагружении образцов, показали, что при нанесении лазерных «дорожек» без перекрытия с последующим азотированием трещиностойкость малоуглеродистых сталей увеличивается в 1,5 раза.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность руководителю Лаборатории механических свойств конструкционных материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН профессору **Терентьеву В.Ф.** и **Бочвару А.Г.** за помощь в проведении усталостных испытаний, фрактографических исследований и интерпретации полученных результатов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с
2. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 306 с.
3. Чудина, О.В. Технологические пути повышения механических свойств сталей на основе структурной теории прочности // Технология металлов. - 2003. - № 6. - С. 16-23.
4. Чудина, О.В. Механизмы упрочнения железа при лазерном легировании и азотировании / О.В. Чудина, Л.Г. Петрова, Т.М. Боровская // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2002. - № 4. - С. 20-26.
5. Браун, Э.Д. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др., Под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Центр «Наука и техника», 1995. - 778 с.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТРУБОПРОВОДОВ В КОНТАКТНЫХ ЗОНАХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Р.Г. Канцев,

М.А. Скотникова, д-р техн. наук, профессор

А.А. Альхименко, В.В. Морозов,

А.А. Москалец, ст. преподаватель

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

На примере трубопроводов паровых турбин атомных электростанций (АЭС), разработана экспериментальная методика оценки тепловых потерь в контактных зонах, позволяющая учесть конструктивные особенности трубопровода: форму сопряжений и стыков секций теплоизоляции, с учетом свойств реальных сварных, заклепочных и иных трибоузлов. В работе рассмотрены вопросы моделирования и создания теплоизоляционной одно- и двухцилиндровой конструкции для защиты от тепловых потерь трубопроводов, с использованием минеральной ваты. Показано, что наибольшие тепловые потери наблюдаются в местах продольных (70-100 °С) и торцевых (70-90 °С) соединений на поверхности теплоизоляционных цилиндрических блоков, и особенно на стыках двух блоков (110-115 °С).

Ключевые слова: Тепловые потери; Трубопровод; Контактные зоны

ESTIMATION OF HEAT LOSSES OF PIPELINES IN CONTACT AREAS OF STEAM TURBINE

R.G. Kantsev,

M. A. Skotnikova, Doctor of Technical Sciences, Professor

A. A. Alkhimenko, V.V. Morozov,

A.A. Moskalets, Senior Lecturer

Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University

Using the example of pipelines of steam turbines of nuclear power plants (NPP), an experimental method for assessing heat losses in contact zones has been developed, which allows taking into account the design features of the pipeline: the shape of interfaces and joints of thermal insulation sections, taking into account the properties of real welded, riveted and other tribo-nodes. The paper considers the issues of modeling and creating a heat-insulating one- and two-cylinder structure to protect pipelines from heat losses using mineral wool. It is shown that the greatest heat losses

are observed in the places of longitudinal (70-100°C) and end (70-90°C) joints on the surface of thermal insulation cylindrical blocks, and especially at the joints of two blocks (110-115°C).

Keywords: Heat losses; Pipeline; Contact areas

Введение

Теплоизоляционные материалы и конструкции снижают тепловые потери оборудования в окружающую среду, поддерживают заданные температуры компонентов в технологических процессах, создают нормальные температурные условия для обслуживающего персонала и являются обязательной частью защитных элементов промышленного оборудования, например, трубопроводов паровых турбин атомных электростанций (АЭС). [1-3].

Снижение тепловых потерь является важной задачей энергетики. Как правило, тепловые потери уменьшаются за счет применения различного вида теплоизоляционных материалов и конструкций. Объектом исследования являлась теплоизоляция для паровых труб водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР-1000) [4-7].

Материалы и методы

В качестве теплоизоляционного материала использовалась минеральная вата, содержащая компоненты пяти основных оксидов: 36 % SiO_2 , 15 % Al_2O_3 , 1 % Fe_2O_3 , 20 % CaO , 3 % MgO . Связующие вещества скрепляли волокна между собой, фиксировали объемную массу изделия.

В качестве теплоизоляционных конструкций для защиты от тепловых потерь трубопроводов диаметром менее 500 мм, была предложена конструкция на основе одного или двух сборных цилиндрических блоков. При сборке двух половинок цилиндров, формировались продольные и торцевые контактные зоны (рис. 1, а), которые могли быть местами повышенных тепловых потерь.



Рис.1. Сборная теплоизоляционная цилиндрическая конструкция с наполнителем из минеральной ваты: с продольным (а) и торцевым контактом (б) [3]

Поэтому, торцы перекрывали дисками со слоем волокнистой теплоизоляционной минеральной ваты (рис. 1, б).

Результаты

Разработка методики оценки тепловых потерь трубопровода

Была разработана модель теплоизоляции трубопровода водородного энергетического реактора (ВВЭР-1000), состоящая из изолируемой трубы 219×10 мм, длиной 690 мм, на которой были установлены опытные сквозные (рис. 2, а) и торцевые (рис. 2, б) теплоизоляционные блоки с торцевыми дисками (рис. 2, в). Каждый блок был выполнен в виде полого полуцилиндра, длиной 345 мм, с наружным и внутренним диаметрами, равными соответственно, 426 и 226 мм. В качестве теплоизоляционного материала в блоках была использована волокнистая минеральная вата.

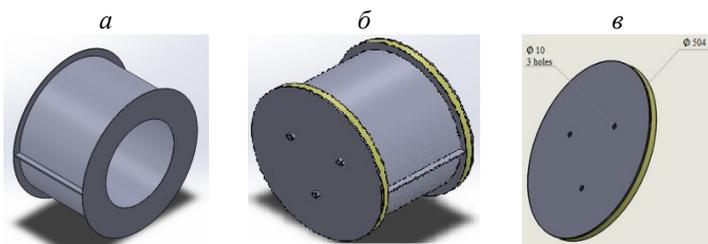


Рис. 2. Модель блоков сквозной (а), торцевой (б) теплоизоляции, торцевой диск с минеральной теплоизоляцией с внутренней стороны (в)

Составлено авторами

Оценка свойств тепловых потерь происходила за счёт контроля возрастания температуры на поверхности, продольных и торцевых контактных зон блоков (рис. 3, а, б).

В качестве теплоизоляционной конструкции (1) для защиты изолируемой трубы (2) от тепловых потерь был использован один блок на основе двух сборных полуцилиндров и торцевых дисков (3) со слоем минеральной ваты (5). Электронагревательная лента из нержавеющей стали (6) с терморегулятором поддерживала внутри изолируемой трубы (2) рабочую температуру 350 °С, соответствующую реальным условиям эксплуатации трубопроводов паровых турбин. Три резьбовые шпильки (4), вкрученные в отверстия $\text{Ø}10$ на торцевых дисках (рис. 2, в), скрепляли корпус конструкции с дисками и поддерживали теплоизоляционную минеральную вату (5).

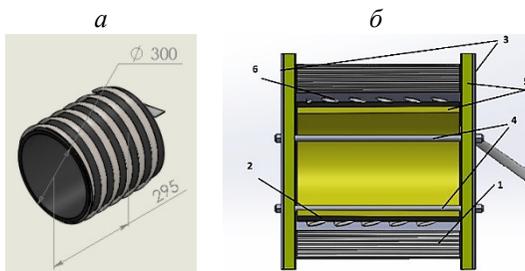


Рис. 3. Модель электронагревательной ленты (а) и нагревательная лента в составе сборной теплоизоляционной цилиндрической конструкции (б):
1– теплоизоляционная конструкция; 2–изолируемая труба; 3–диски; 4–шпильки;
5–минеральная вата; 6–нагревательная лента
Составлено авторами

Преимуществом разработанной методики является наглядная демонстрация проблемных мест в теплоизоляционной конструкции. Так же имеется возможность устанавливать и испытывать любые опытные теплоизоляционные блоки для изучения особенностей потерь тепла через поверхность и контактные зоны.

Проведение испытаний по оценке тепловых потерь трубопровода

Испытания по оценке тепловых потерь проводились на теплоизоляционных цилиндрических конструкциях двух типов: одного и двух блоков, образующих контактные зоны продольные, торцевые и в стыке двух блоков (рис. 4).

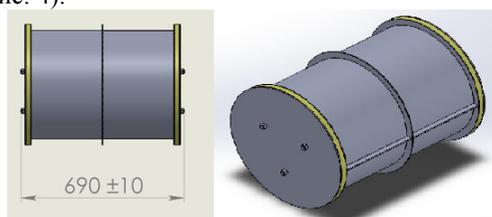


Рис. 4. Сборка теплоизоляционной конструкции из двух блоков
Составлено авторами

Температура во внутренней полости блоков поднималась до 350 °С, после чего электронагреватель выключался. Замеры температуры че-

рез каждые 10 минут в 20 точках на поверхности конструкции, позволили установить кинетику нарастания температуры (тепловые потери трубопровода) и начало выхода на стационарный режим теплообмена через 90-100 мин (рис. 5).

Температура наружной поверхности минеральной ваты после завершения 100 мин испытаний увеличилась на 15,0 °С по отношению к температуре до начала испытаний. Оказалось, что наибольшие тепловые потери наблюдались в местах продольных (70-100 °С) и торцевых (70-90 °С) соединений на поверхности теплоизоляционных цилиндрических блоков, и особенно на стыках двух блоков (110-115 °С).

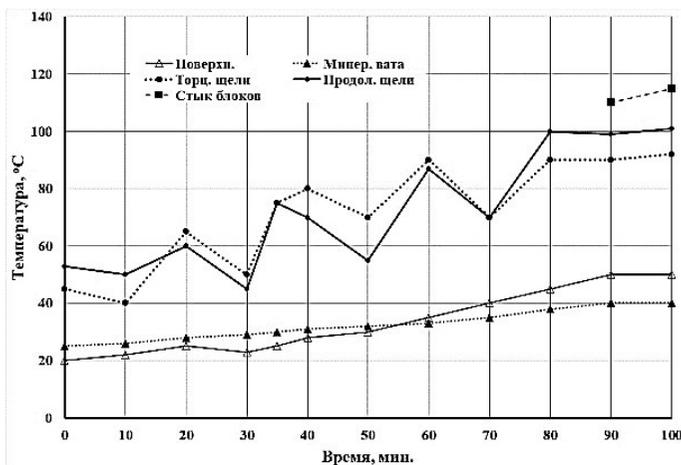


Рис. 5. Кинетика изменения средних температур наружных поверхностей теплоизоляционных конструкций из одного блока и стыка двух блоков
Составлено авторами

Обсуждение

Исходя из полученных результатов измерения температуры поверхности конструкций во времени, можно заключить, что на большей площади поверхности теплоизоляционной конструкции температура не превышала 50 °С. В процессе передачи тепла, в сечении конструкций формируются значительные градиенты температуры. Поэтому можно полагать, что в местах стыка цилиндрических блоков возникают внутренние термические напряжения [8 - 10].

Разработанная методика оценки тепловых потерь трубопроводов паровых турбин и проведённое исследование помогли увидеть недостат-

ки теплоизоляционной одно- и двухцилиндровой конструкции, в частности, большой дополнительной работы требует изучение мест стыка двух теплоизоляционных цилиндрических блоков. Это позволит пересмотреть подход к технологии изготовления таких стыков.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований: – разработана методика оценки тепловых потерь трубопроводов паровых турбин; – в компьютерной программе «КОМПАС-3D» разработаны трёхмерные модели теплоизоляционных конструкций и их отдельных элементов; – созданы необходимое оборудование и оснастка; – проведены испытания наружных поверхностей теплоизоляционных конструкций из одного и двух цилиндрических блоков.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

– наибольшие тепловые потери наблюдались в местах продольных (70-100 °С) и торцевых (70-90 °С) контактных зон на поверхности цилиндрических блоков, и особенно на стыках двух блоков (110-115 °С);

– минеральная вата, как теплоизоляционный материал, пригодна для выполнения возложенной на неё функции по снижению тепловых потерь. После завершения 100 мин испытаний её температура увеличилась на 15,0 °С по отношению к температуре до начала испытаний.

– теплоизоляционная конструкция из цилиндрических блоков пригодна для выполнения возложенной на неё функции по снижению тепловых потерь. После завершения 100 мин испытаний температура её поверхности не превышала 50 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шойхет, Б.М. Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей / Шойхет, Б.М., Ставрицкая Л.В. // Энергоснабжение. - 2002. - № 5. – С. 43-46.
2. Шойхет, Б.М. Региональные нормы по тепловой изоляции оборудования и трубопроводов / Шойхет, Б.М. Овчаренко Е.Г. и др. // Энергосбережение. - 2001. - № 6. – С. 65-68.
3. Комягин, В.В. Вибрационные испытания теплоизоляции оборудования РУ ВВЭР-1000 с модернизированными блоками БСТИ / В.В. Комягин, А.В. Селезнев и др. // Сб. трудов 4-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС С ВВЭР» 23-26 мая 2005. - Подольск. С. 29.
4. Шойхет, Б.М. Тепловая изоляция промышленных трубопроводов / Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая и др. // Энергоснабжение. - 2000. - № 5. – С. 59-61.
5. Кириллов, Ю.И. Состояние тепловой изоляции на электростанциях ОАО РАО «ЕЭС России» / Ю.И. Кириллов, М.А. Мотлохов и др. // Энергетик. - 2005. - № 11. – С. 2-5.

6. Kuznetsov, G.V. Numerical Simulation of the Thermal State of a Flooded Pipeline Taking into Account Unsteadiness of the Process of Heat Insulation Saturation with Moisture / G.V. Kuznetsov, V.Yu. Polovnikov // *Thermal Engineering*. - 2008. - Vol.55. no. 5. – P. 426-430.
7. Kuznetsov, G.V. Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding / G.V. Kuznetsov, V.Yu. Polovnikov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. -2008. - Vol. 81, no. 2. – P. 323-331.
8. Бобров, Ю.Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции: Учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко и др. - М.: ИНФРА-М, 2003. - 268 с.
9. Skotnikova, M.A. About the nature of dissipative processes in cutting treatments of titanium vanes / M.A. Skotnikova, N.A. Krylov // *J. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. - 2017. – С. 115-123.
10. Skotnikova M.A. Formation of rotation in titanium alloys at shock loading / M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, etc. // *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium*. - 2012. – С. 540–543.
11. Skotnikova, M.A. Structural and Phase Transformation in Metals at High-Speed Cutting and Tool Wear / M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, etc. // *Procedia Engineering* - 2017. (206). pp. 777–782.

УДК 620.178

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ РУЧНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ ЭЛЕКТРОДАМИ С ЗЕРНАМИ ТВЕРДОГО СПЛАВА

**Витянис Янкаускас, д-р техн. наук, профессор
Элигиус Новиковас**

Университет Витаутаса Великого (Vytautas Magnus university), Каунас,
Литовская Республика

Изучение абразивному износу стойких слоев включает ударное измельчение твердосплавных пластин использованного металлорежущего инструмента, изготовление электродов ручной наплавки в обмазке содержащих зерна твердо сплава, наплавку образцов, исследование состава наплавленных слоев, микро-структуры, твердости, абразивного износа наплавленных слоев. Применение разработанной технологии наплавки покрытий, абразивный износ (по отношению стали Hardox 400), при малых контактных нагрузках уменьшает 5,9–9,6 раз, а при высоких нагрузках – 1,12–1,35 раза. При малых контактных нагрузках величина фракции твердосплавных зерен оказывает большое влияние на износ, а при высоких нагрузках, величина зерен не имеет очевидного влияния.

Ключевые слова: наплавленные слои, твердосплавные зерна, твердость, микроструктура, абразивный износ

EXAMINATION OF ABRASIVE WEAR OF LAYERS OBTAINED BY MANUAL ARC DEPOSITION OF ELECTRODES WITH HARD ALLOY GRAINS

Vytenis Jankauskas, Eligijus Novikovas

Vytautas Magnus University, Kaunas, Republic of Lithuania

Study of abrasive wear of resistant layers includes impact grinding of hard alloy plates of used metal-cutting tool, manufacture of electrodes of manual surfacing in coating of solidly alloy containing grains, surfacing of samples, analysis of composition of deposited layers, microstructure, hardness, abrasive wear of deposited layers. The application of the developed coating deposition technology, abrasive wear (in relation to Hardox 400 steel), at low contact loads reduces 5.9-9.6 times, and at high loads - 1.12-1.35 times. At low contact loads, the size of the carbide grain fraction has a large effect on wear, and at high loads, the grain size has no obvious effect.

Keywords: *deposited layers, carbide grains, hardness, microstructure, abrasive wear*

Введение

На стоимость использования почвообрабатывающих машин сильно влияет абразивный износ, который приводит к значительным потерям. Этот износ хорошо изучен и легко предсказуем [1,2].

Сильному абразивному износу подвержены непосредственно с почвой контактирующие рабочие части почвообрабатывающих машин – лемеха, долота, отвалы, культиваторные лапы и др. При быстром износе рабочих частей изменяются их конструктивные параметры, падает качество обработки, увеличивается сопротивление тяговому усилию [2,3].

При износе рабочих частей до предельных размеров их заменяют новыми или ремонтируют электродуговой наплавкой твердыми слоями. При наплавке рабочая поверхность деталей покрывается слоем необходимого состава с высокими механическими и физическими свойствами. Наплавленные слои толсты, прочны, имеет высокую адгезию, поэтому электродуговая наплавка рациональным способом повышения долговечности этих деталей [2,3].

Исследования показывают, что упрочнять поверхности в условиях высоких контактных нагрузок работающих деталей наплавкой высоколегированными слоями нерационально [2]. Кроме того, в твердых слоях, как правило используются тугоплавкие и др. металлы (W, Ti, Nb, V, Cr и др.), что увеличивает стоимость их наплавки (восстановления) деталей [2].

Влияние электродуговой наплавки на уменьшение абразивного износа было исследовано на каменистых почвах Турции [4]. В таких условиях снижение износа и стоимости использования машин имеет экономический смысл. Существенное уменьшение простоев машин составляет значительную часть экономии.

Ученые [5, 6] изучали влияние размера зерен карбида в напыленных и наплавленных слоях на износ, а также применяли производственные отходы производства металлорежущего инструмента. Результаты этих исследований показывают, что в наибольшей степени износостойкость повышает твердосплавные зерна размером 0,5–0,9 мм.

Влияние размера зерна упрочняющей фазы покрытия на износ было исследовано учеными [7, 8].

Все больше исследований проводится средствами моделирования износа, что позволяет снизить стоимость получения результатов, но соответствие результата реальным условиям требует дополнительной оценки

механических свойств почвы и композиционных покрытий [9].

Изношенные пластинки твердосплавного режущего инструмента являются сырьем производства режущего инструмента, наплавочных материалов, цена которых при переработке увеличивается более, чем в десять раз. Поэтому прямое применение измельченного инструмента является экономически более выгодным решением.

Целью работы являлись исследования абразивного износа наплавленных слоев разработанными электродами ручной наплавки с твердосплавными частицами в обмазке электродов.

Материалы и методы

Исследования начаты измельчением твердосплавных пластин использованных сверл, фрез, токарных резцов. Режущие пластины измельчали в Таллинском технологическом университете дезинтеграторами DSL-350 и DSL-175. Зерна измельченных пластин сортировали по размерам прибором Fritsch Analysette 3 на 6 фракций: 0,18-0,355 / 0,355-0,5 / 0,05-0,71 / 0,71-1,0 / 1,0-1,4 / 1,4-2,0 мм).

Электроды ручной сварки с твердосплавными зёрнами в обмазке электродов производили в ЗАО «Аникшчюварис». Для защиты, раскисления и легирования сварочной ванны использовали стандартную базовая обмазку УОНИ-13/55. В состав обмазки входили: минералы (мрамор, известняк, флюорит кальция, кварцевый песок и слюда мусковит), а также ферросплавы (ферромарганец, ферросилиций и ферротитан). Материалы связаны жидким натриевым стеклом, высушены и измельчены. Концентрацию твердосплавных зёрен в обмазке определили с целью получения в наплавленном слое 35% по массе. Обмазку наносили промышленным прессом Oerlikon CEP-141, сушили в промышленных сушилках. Диаметр электродной проволоки 4,0 мм.

Наплавку образцов проводили инвертером Fronius MW2600. Состав наплавленных слоев исследовали спектрометром BELEC comraclab. (ЗАО «Аникшчюварис»).

Остальные тесты проводили в лаборатории Трибологии университета Витаутаса Великого:

- Твердость наплавленных слоев измеряли твердометром Роквелла RK 4-16Y (среднее из шести измерений);
- Абразивный износ оценили согласно с ASTM G65-04 [10] моделируя низкое и высокое контактное давление двумя парами трения – двух тел (резина – абразив – наплавленный слой) и трех тел (сталь – абразив – наплавленный слой);
- Образцы резали прибором Struers Secotom-15, шлифовали и полировали

STRUERS Tegramin-20; микроструктуру исследовали металлографическим микроскопом Nikon Eclipse MA 100.

Испытание на износ (таблица 1) проводили путем подачи абразивных частиц между поверхностями резиновых / стальных рабочих колес и наплавленным образцом.

Таблица 1. Условия испытаний ASTM G65-04

Условия испытаний	Пара трения	
	Двух тел	Трех тел
Скорость вращения диска n , мин ⁻¹	200	
Нагрузка F , Н	130	85
Абразив	Кварцевый песок (SiO ₂ , 800–1100 HV, 250–400 μm, 300 g·min ⁻¹)	
Продолжительность, мин	20	3

Абразивный износ определили по разнице массы образцов до и после испытания на весах KERN EG 420-3NM (точность 0,001 г). Для сравнения результатов представлены аналогичные характеристики износостойкой стали Hardox 400, применяемой для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Результаты

Состав наплавленных слоев приведен в таблице 2. Наплавленные слои содержат 3–4 % углерода, ~2 % кремния, 3,5–4% марганца, 6–8 % хрома, ~3 % кобальта, 25–33 % вольфрама, т.е. легирование слоя происходило путем плавления электрической дугой обмазки электродов с тугоплавкими (карбидными) зёрнами использованных режущих пластинок металлорежущего инструмента.

Значения износов, их величины рассеяния и твердостей наплавленных слоев приведены в таблице 3 и на рис. 1.

Таблица 2. Химический состав наплавленных слоев (% по массе)

№ образца	Размер зерна h , мм	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Ni	Ti	Nb	Co	W
1	0,18–0,355	3,15	2,05	3,67	0,27	6,19	0,56	0,14	0,86	0,16	2,77	31,1
2	0,355–0,5	4,19	1,97	3,9	0,33	8,63	0,6	0,16	0,79	0,19	3,13	26,7
3	0,5–0,71	3,43	2,04	4,14	0,27	6,97	0,7	0,18	0,89	0,24	3,06	25,1
4	0,71–1,0	3,64	2,13	3,8	0,28	7,21	0,61	0,19	0,97	0,24	2,93	30,2
5	1,0–1,4	3,08	2,21	3,88	0,25	6,12	0,66	0,14	0,88	0,17	3,31	33,4
6	1,4–2	4,03	2,12	3,49	0,29	6,21	0,57	0,14	0,71	0,2	3,43	37,3

Состав бором микролегированной стали Hardox 400 (%): C - 0,32; Si - 0,7; Mn - 1,6; Cr - 1,4; Mo - 0,6; Ni - 1,5; B - 0,004; P - 0,02; S - 0,01. Остаток - железо

Таблица 3. Износ наплавленных слоев в тесте ASTM G65-04 и их твердость

№ образца	Средний размер зерна h , мм	Средний износ поверхности I , (г) с доверительным интервалом в парах трения		Средняя твердость, HRC
		Метод двух тел	Метод трех тел	
H400	0	0,354±0,015	0,686±0,006	40
1	0,268	0,06±0,011	0,576±0,017	56
2	0,428	0,049±0,001	0,552±0,001	50
3	0,605	0,041±0,003	0,599±0,039	53
4	0,855	0,037±0,001	0,615±0,005	53
5	1,2	0,057±0,007	0,587±0,004	50
6	1,7	0,06±0,007	0,509±0,017	56

Обсуждение

Твердость наплавленных слоев приведена на рис. 1.

Небольшие различия концентрации легирующих элементов в наплавленных слоях обеспечивает высокую твердость и небольшое рассеяние значений твердости наплавленных слоев – от 50 до 56 HRC. Только легированные слои со средней величиной зерен 1,2 и 1,7 и 0,268 и 1,2 мм имеют значимые различия в твердости.

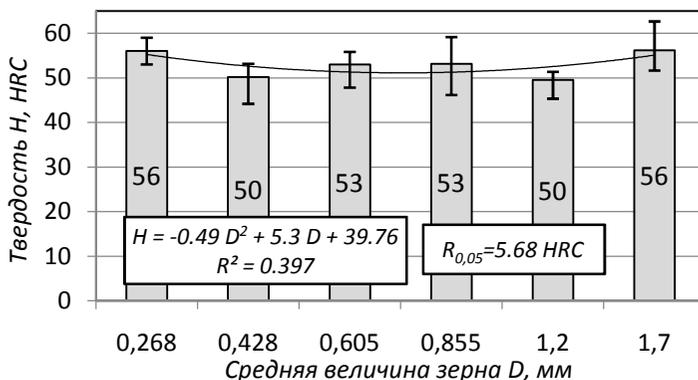


Рис. 1. Влияние средней величины зерна твердого сплава на твердость наплавленных слоев
 Составлено авторами

Результаты испытаний на абразивный износ показывают возможное

большое рассеяние величин в паре трения «резина – абразив – наплавленный слой» 0,037–0,06 г. (рис. 2) и небольшое рассеяние результатов в паре трения «сталь – абразив – наплавленный слой» 0,509–0,615 г. (см. рис. 2).

Влияние средней величины зерна наплавленного слоя на износ при низком контактном давлении (пара трения двух тел) показано на рис. 2.

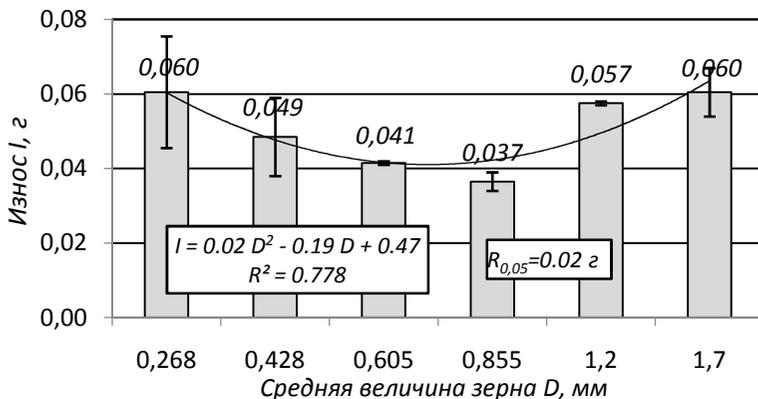


Рис. 2. Влияние средней величины зерна наплавленного слоя на износ (пара трения двух тел «резина – абразив – наплавленный слой») Износ стали **Hardox 400** 0,354 г
Составлено авторами

Результаты исследования износа наплавленных слоев при низких контактных нагрузках показали:

- Износ наплавленных слоев по сравнению со стандартной бором микрорелегированной стали **Hardox 400**, от 5,9 до 9,6 раз меньше.
- Наименьше изнашивается наплавленные слои с зернами величиной 0,605 и 0,855 мм.

Влияние размера зерна наплавленного слоя на износ при высоком контактном давлении (ASTM G65-04, пара трения трех тел «сталь – абразив – наплавленный слой») показано на рис. 3.

Рис. 3 показывает, что в условиях больших контактных нагрузках:

- Износ при больших контактных нагрузках более 70 раз интенсивнее по сравнению с износом при малых контактных нагрузках;
- Интервал средних величин износов при высоких контактных нагрузках мал и составляет от 0,509 до 0,615 г.; Наплавленные слои изнашивались только 1,115–1,348 раза меньше, чем сталь **Hardox 400**; меньше

всего износились наплавленные слои с величиной зерен 0,428 и 1,7 мм.

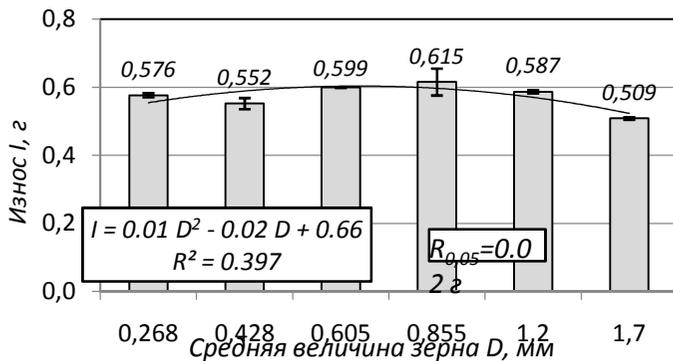


Рис. 3. Влияние средней величины зерна наплавленного слоя на износ (пара трения трех тел «сталь – абразив – наплавленный слой») Износ стали Hardox 400 – 0,686 г
 Составлено авторами

Микроструктура наплавленного слоя представлена на 4 рис.

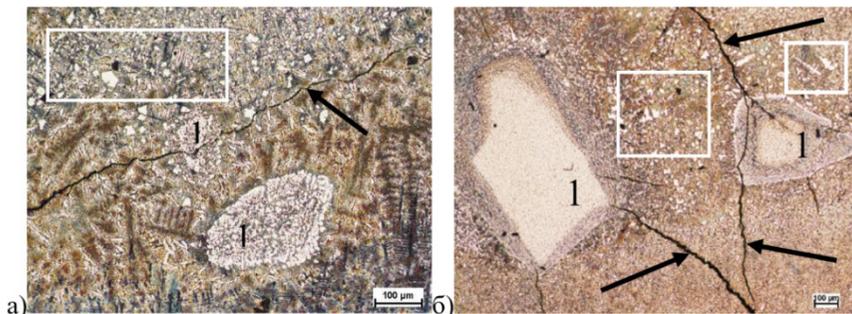


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя с 0,18–0,355мм (а) и 0,5–0,71 мм (б) зёрнами твёрдосплавного инструмента: □ – матрица наплавленного слоя с карбидами тугоплавких металлов; 1 – твёрдосплавные зёрна;

← – трещины

Составлено авторами

Дуговая наплавка покрытыми электродами с зёрнами тугоплавких металлов в обматке позволяет получать высоколегированные наплавлен-

ные слои, состоящие из зерен карбидов, двойных карбидов в железной матрице [$\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$ и $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$] и небольших количеств $\text{Fe}_{0,95}(\text{WC})_{0,05}$. Большая (не менее 0,1 мм) диффузионная зона, образующаяся на контакте зерен с матрицей, является следствием сильного дугового нагрева (~ 2000 °С). Из-за больших различий температур плавления и других физических характеристик в наплавленном слое образуется сеть трещин. Некоторые трещины приводит к растрескиванию самих твердосплавных зерен 1 (рис. 4).

Заключение

1) Твердость наплавленных слоев с зёрнами твердосплавных режущих пластинок (~35 % по массе), находится в интервале 50–56 HRC.

2) При низком контактном давлении между поверхностью и абразивом наиболее износостойкими являются наплавленные слои со средним размером зерен 0,605 и 0,855 мм. При высоком контактном давлении между поверхностью и абразивом наиболее износостойкими являются наплавленные слои со средним размером зерна 0,428 и 1,7 мм.

3) Результаты лабораторных исследований при низких контактных давлениях абразива на наплавленный слой, показывает, что по сравнению со сталью Hardox 400, изнашивается в среднем в 5,9–9,6 раз меньше, а при высоких контактных давлениях - в 1,12–1,35 раза.

4) В случае абразивного износа при низком контактном давлении средний размер зерна оказывает значительное влияние на интенсивность износа, а при высоком контактном давлении размер зерна не оказывает значительного влияния на износ.

5) Микроструктура наплавленного слоя состоит из железной матрицы с двойными карбидами вольфрама ($\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ и $\text{Fe}_{0,95}(\text{WC})_{0,05}$) и упрочняющей фазы – зерен твердых сплавов. Твердосплавные зёрна окружены диффузионной зоной – более 0,1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stachowiak, G., & Batchelor, A. (2014) Engineeringtribology. 4th Edition. New York, USA: Butterworth-Heinemann, 884 p.
2. Jankauskas, V. (2006). Strengthening machine elements working under abrasive environment by alloying with hard layers and their estimation. *Mechanika*. 57 (1), 55-60.
3. Jankauskas, V., Kreivaitis, R., Stonkus, D., & Andriušis, A. (2008). Research of strengthening plough parts by welding. *Mechanika*. 69(1), 80-84.
4. Bayhan, Y. (2006). Reduction of wear via hardfacing of chizel ploughshare. *Tribology international*. 39, 570–574.

5. Saito, H., Iwabuchi, A. & Shimizu, T. (2006) Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide. *Wear*. 261(2), 126-132.
6. Bendikiene, R., Ciuplys, A., & Kavaliauskiene, L. (2019) Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. *Journal of Cleaner Production*. 229, 1225-1232.
7. Jankauskas, V., Antonov, M., Varnauskas, V., Skirkus, R. & Goljandin, D. (2015) Assessment of the reliability of hardfacings for soil ripper. *Journal of Friction and Wear*. Vol. 36 (1), 89–95.
8. Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Savková, J., Jirka, M. & Navrátilová, M. (2009). Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys. *Res. Agr. Eng.*, 55: 101-113.
9. Katinas, E., Choteborsky, R., Linda, M. & Jankauskas, V. (2019) Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method. *Biosystems engineering*. 188, 305-319.
10. ASTM G65–04. (2010) Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСИЙ МАЛОСЛОЙНЫХ ГРАФИТОВЫХ ФРАГМЕНТОВ В ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗКАХ

М.А. Шилов^{1,2}, канд. техн. наук, доцент
А.А. Бурков², канд. хим. наук, доцент
Д.Н. Столбов³, канд. физ.-мат. наук, доцент
А.И. Смирнова³,
Н.В. Усольцева³, д-р хим. наук, профессор

¹Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина

²Вятский государственный университет

³Ивановский государственный университет

Осцилляционным (неразрушающим) методом исследованы вязкоупругие характеристики дисперсий на основе трех промышленно выпускаемых пластичных смазочных материалов (ПСМ) с присадками новых углеродных наноструктур (УНС): малослойных графитовых фрагментов (МГФ). Концентрация присадок варьировалась от 0,1 до 1,5 мас. %. Исследования проводились в диапазоне частот от 0,1 до 12 Гц. Установлено, что свойства дисперсий ПСМ/МГФ зависят от концентрации введенных УНС. При концентрациях свыше 0,5 мас. % присадка УНС разрушает каркас загустителя и в следствие этого снижает упругость системы. Эксплуатация таких смазочных материалов будет сопровождаться подтеканием базового масла в зоне контакта, поэтому они могут быть использованы только в закрытых узлах трения. Добавка присадок в концентрациях ниже 0,5 мас. % не изменяет структурирование базовых ПСМ и такие дисперсии могут быть использованы для подшипниковых узлов трения.

Ключевые слова: Реология, вязкоупругость, дисперсии, малослойные графитовые фрагменты, пластичная смазка

VISCOELASTIC PROPERTIES OF DISPERSIONS OF FEW-LAYER GRAPHITE FRAGMENTS IN PLASTIC LUBRICANTS

M.A. Shilov^{1,2}, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
A.A. Burkov², Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
D.N. Stolbov³, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Associate Professor

A.I. Smirnova³,

N.V. Usol'tseva³, Doctor of Chemical Sciences, Professor

¹Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin

²Vyatka State University

³Ivanovo State University

The viscoelastic characteristics of dispersions based on three commercially available plastic lubricant materials (PLM) with additives of new carbon nanostructures (CNS): few-layer graphite fragments (LGF) were studied by the oscillatory (non-destructive) method. The concentration of the additive was varied from 0.1 to 1.5 wt. %. The studies were carried out in the frequency range from 0.1 to 12 Hz. It was found that the properties of PLM/LGF dispersions depend on the concentration of the introduced CNS. When concentrations of the additive were above 0.5 wt. %, LGF destroys the thickener framework and, as a consequence, reduces the elasticity of the system. The operation of such lubricants will be accompanied by the leakage of base oil in the contact zone. Therefore, they can only be used in closed friction units. When the LGF concentrations were below 0.5 wt. %, its addition does not change the structuring of the base PLM and such dispersions can be used for bearing friction units.

Keywords: Rheology, viscoelastic, dispersions, a few-layers graphite, plastic lubricant

Введение

В движущихся деталях машин снижение трения и износа представляет собой очень важную проблему для повышения срока службы движущихся поверхностей и снижения энергозатрат. Большое количество энергии теряется в движущихся частях в процессе трения. Например, автомобильные двигатели на преодоление трения теряют около 7,5 % мощности, вырабатываемой при сгорании топлива [1]. Обычно для снижения трения и механического износа движущихся металлических деталей применяют смазочные материалы (СМ). Наряду с этим, СМ выполняют функцию отвода тепла, выделяемого при трении, а также используются для создания смазочных пленок между движущимися частями, чтобы предотвратить непосредственный контакт последних.

Важными элементами различных механизмов являются подшипники, способствующие плавному перемещению двух поверхностей относительно друг друга. Пластичные смазочные материалы (ПСМ), которые используются для этих целей, являются сложными многокомпонентными системами, обладающими полифункциональными свойствами. Свойства ПСМ определяются входящими в их состав присадками. При разработке

эффективных смазочных материалов, используемых для подшипниковых узлов трения, важно учитывать условия эксплуатации (высокие величины удельных нагрузок, скоростей сдвига, температур и т.д.). Использование углеродных наноструктур (УНС) в качестве присадок к ПСМ является эффективным способом снижения трения и износа [2]. Интерес ученых-трибологов к УНС неизменно сохраняется в течение последнего десятилетия, поскольку эти наноструктуры отвечают вышеупомянутым условиям. Однако, имеющиеся в настоящий момент литературные данные носят разрозненный и не систематизированный характер.

Ранее нами было установлено влияние аллотропной формы углерода на эффективность действия пластичных смазок [2, 3]. Доказано, что 2D-структуры углерода (окисленный графен) за счет своей плоской формы позволяют снижать величину пятна износа почти на 20 % [4]. Продолжая эти исследования, в настоящей работе мы представляем данные по новым 2D-структурам – малослойным графитовым фрагментам (МГФ), использованным в качестве добавок к ПСМ.

Реология оказалась отличным инструментом для анализа механических свойств ПСМ [5, с. 104]. Для полной характеристики реологического поведения СМ могут быть использованы два подхода: разрушающий (сдвиговый) и неразрушающий (осцилляционный) методы испытаний. Для ПСМ предпочтительнее использовать осцилляционный тест [2], который не изменяют внутреннюю структуру системы и при этом дает более точную информацию о реологических характеристиках этих конденсированных фаз.

Для получения сопоставимых данных о вязкости в результате эксперимента с частотной разверткой, применяемая синусоидальная (осцилляционная) колебательная деформация должна быть относительно небольшой и находиться в пределах линейного вязкоупругого диапазона смазочного материала. В этом диапазоне микроструктура материала остается неизменной, а реологические характеристики, такие как комплексная вязкость (η^*), модуль накопления и модуль потерь (G' и G'' , соответственно) являются постоянными и не зависят от приложенного напряжения или деформации. Как только достигается критическое значение деформации или напряжения, микроструктура материала начинает меняться, приводя к изменению реологических параметров [6]. Эти положения были использованы при проведении наших исследований.

Целью работы является определение влияния МГФ на вязкоупругие свойства трех промышленно выпускаемых пластичных смазочных материалов. Полученные данные послужат основой для оптимизации трибологических характеристик имеющихся на рынке отечественных

ПСМ в условиях импортозамещения.

Материалы и методы

В качестве базовых пластичных смазочных материалов (ПСМ) использовались одна импортная – ClaasAGRIGREASEEP2 (I) и две отечественные смазки Газпромнефть LXEP2 (II) и Литол-24 (III). Синтез МГФ проводили методом химического осаждения из паровой фазы на матрице MgO в соответствии с процедурой, описанной в [6]. Массовая доля твердой углеродной присадки МГФ, введенной в ПСМ, варьировалась от 0,1 до 1,5 мас. %. Образцы дисперсий готовили механическим перемешиванием ПСМ с добавками УНС (навески ПСМ и УНС взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг).

Для определения реологических характеристик исследуемых образцов использовался реометр “StressTech” производства фирмы “REOLOGIC AInstruments AB”. Данное оборудование представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из измерительного устройства (ротационный вискозиметр) с цифровым интерфейсом и персонального компьютера, снабжённого программным обеспечением для управления измерительным устройством и обработки данных экспериментов. Предусмотрено использование воспринимающих элементов типа “конус—плоскость” или “плоскость—плоскость”. В нашем случае применялась система “плоскость—плоскость” следующей геометрии: 2r - 20 мм, зазор между плоскостями - 0,4 мм. Вращение вала осуществлялось с помощью турбины низкого трения, питаемой сжатым воздухом. Установка зазора между воспринимающими элементами осуществлялась с помощью высокоточного автоматического микрометра. Для поддержания постоянной температуры использовалось термостатирование с точностью 0,1 °С. Осцилляционный тест выполнялся при постоянной температуре 22 °С. Вязкоупругие характеристики определяли при варьировании частоты сдвига, которая изменялась в пределах от 0,1 до 12 Гц. Каждый тест проводили пятькратно в диапазоне линейной вязкоупругости. Максимальная погрешность определения вязкости и параметров вязкоупругости составляла менее $\pm 3\%$.

Результаты и обсуждение

Как было указано выше, прямое измерение вязких и упругих свойств дисперсий МГФ в ПСМ проводили на линейном участке частотной развертки. Оно связано с определением модулей накопления и потерь (G' и G'' , соответственно), а также тангенса угла потерь ($tg\delta$). Хотя все три исследованные ПСМ имеют значения $tg\delta < 1$, что свидетельст-

вует о вязкоупругом состоянии [2], но модули накоплений базовых смазок отличаются в 1,5 – 2 раза.

Введение в ПСМ **I–III** малослойных графитовых фрагментов привело к снижению величин модулей накопления (G') во всем диапазоне концентраций по сравнению с базовыми ПСМ. Исключением является увеличение G' при введении 0,5 мас. % МГФ в ПСМ **II**. Максимальное снижение значения G' с 6200 до 50 Па наблюдалось при введении 1,0 мас. % МГФ в ПСМ **III**.

Анализ данных динамического изменения тангенса угла потерь для всех исследованных дисперсий ПСМ/МГФ показал зависимость этого показателя от концентрации присадки. В диапазоне концентрации МГФ 0,1 – 0,5 мас. % добавка МГФ снижает значение $\text{tg}\delta$, но оно остается меньше единицы ($\text{tg}\delta < 1$), что свидетельствует о сохранении вязкоупругого состояния. Увеличение концентрации МГФ свыше 0,5 мас. % приводит к повышению значения $\text{tg}\delta$, что указывает на переход дисперсий из вязкоупругого состояния в вязкое ($\text{tg}\delta \gg 1$). Полученные результаты хорошо согласуются с данными, опубликованными нами ранее для этих же ПСМ с добавкой других УНС (шунгитовый наноуглерод, углеродные нанотрубки, многослойный окисленный графен) [2].

Заключение

Методом осцилляционных деформаций изучены реологические характеристики и получены данные по вязкоупругим свойствам трех пластичных смазочных материалов и дисперсий на их основе с малослойными графитовыми фрагментами в концентрациях от 0,1 до 1,5 мас. %. Сравнение полученных результатов проводили с данными для базовых ПСМ, для которых ранее нами было установлено уменьшение упругой составляющей комплексного модуля сдвига в следующем ряду: **I>II>III**, что свидетельствовало о более структурированном состоянии импортной смазки по сравнению с отечественными продуктами [2].

Установленное в реологическом эксперименте резкое снижение упругих свойств ПСМ **I**, **II** и **III** при введении МГФ в концентрациях 1,0 и 1,5 мас. % может свидетельствовать о разрушении каркаса загустителя смазочного материала. Наибольшее снижение величины упругой составляющей модуля сдвига по сравнению с базовой смазкой наблюдается в дисперсии ПСМ **III**/МГФ (1,0 мас. %). Вследствие этого эксплуатация смазочных материалов при содержании присадок МГФ свыше 0,5 мас. % будет сопровождаться подтеканием базового масла в зоне контакта. Поэтому они могут быть использованы только в закрытых узлах трения. В противоположность этому, дисперсии ПСМ/МГФ с концентрацией при-

содержат 0,5 мас. % и ниже, в которых сохраняется структурирование базовых ПСМ, могут быть использованы для подшипниковых узлов трения.

Благодарности

Работа поддержана РФФИ (гранты № 18-29-19150_мк, № 20-33-90043_асп) и Минобрнауки РФ (проект № FZZM-2020-0006 для ИвГУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moeller, S.T., *Energyefficiency: issuesand trends*. - NewYork: NovaPublishers. – 2002. – 138 p.
2. Шилов, М.А. и др. Реология пластичных смазочных материалов с присадками углеродных наноструктур различного типа // *Трение и износ*. – 2019. – Т.40. – № 6. - С. 720–730.
3. Парфенов, А.С. и др. Влияние различных аллотропов углерода на трибологические и реологические характеристики модельных смазочных систем // *Трение и износ*. – 2021. – Т.42. – № 3. - С. 338–349.
4. Парфенов, А.С. и др. Трибологические свойства ряда пластичных смазочных материалов в композициях с углеродными наноструктурами различного строения // *Трение и износ*. – 2019. – Т.40. – № 5. - С. 597–604.
5. Ребиндер, П.А. *Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды*. – М.: Наука. – 1979. – 384 с.
6. Кирсанов, Е.А. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеевко. – М.: Техносфера, 2016. – 384 с.
7. Stolbov, D.N. and oth. Influence of differenttypes of carbon nanoflakes on tribological and rheological properties of plastic lubricants // *Fullerens, nanotubes and carbon nanostructures*. – Marcel Dekker Inc. – 2021. – pp. 1-8.
8. Chernyak, S. A. and oth. Effect of Synthesis Conditions on Morphology, Structure, and Defectiveness of Few-Layer Graphene Nanoflakes // *Russ. J. Phys. Chem.* – 2021. - No. 95. – pp. 558–564.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ОТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕСНО-РЕЛЬСОВОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

А.М. Керопян¹, д-р техн. наук, профессор
А.Ю. Албагачиев², д-р техн. наук, профессор
А.В. Калакуцкий¹, П.Е. Митусов¹, М.С. Ермаков³

¹ООО «Московский научно-исследовательский
проектно-изыскательский институт технологий и инноваций»

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова

³Ярославский государственный технический университет

В работе приведены результаты исследования тепловых процессов в зоне контакта колесно-рельсовой системы локомотивов, влияющих на их силу тяги и интенсивность износа взаимодействующих поверхностей. В связи с дискретным характером взаимодействия шероховатых поверхностей, в области площадки контакта микронеровностей подвергаются пластической деформации. В свою очередь, вследствие пластической деформации микронеровностей в зоне взаимодействия выделяется теплота и, как следствие, повышается температура в области площадки контакта, что является причиной снижения механических свойств контактирующих поверхностей колесно-рельсовой системы и уменьшения тяговой способности локомотива. Также выявлено, что обеспечение положительных градиентов механических свойств и температуры в области площадки контакта колесно-рельсовой системы будет способствовать обеспечению критерия предела прочности и увеличения тяговой способности локомотива при условии ограничения температуры в зоне площадки контакта в пределах 400...450 °С.

***Ключевые слова:** износ, микронеровности, пластическая деформация, коэффициент трения, колесно-рельсовая система, коэффициент сцепления, площадка контакта, тяговая способность, тепловой процесс, температура, температурный градиент, градиент механических свойств*

WEAR INTENSITY DEPENDENCE ON THERMAL PROCESSES IN CONTACT ZONE OF SURFACES OF WHEEL-RAIL SYSTEM OF QUARRY LOCOMOTIVES

A.M. Keropyan¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

A.Y. Albagachiev², Doctor of Technical Sciences, Professor
A.V. Kalakutsky¹, P.E. Mitusov¹, M.S. Ermakov³

¹LLC «Moscow Research Design and Survey Institute
of Technologies and Innovations»

²Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences

³Yaroslavl State Technical University

The article presents studies of the thermal processes in the contact zone of the wheels of quarry locomotives with the rail, affecting the traction capacity of quarry locomotives and the wear intensity of interacting surfaces. When the wheel is rolling along the rail, the contact zone is repeatedly loaded. During the friction of two bodies, micro-protrusions of one body repeatedly deform the surface layer of the other body. Due to the fact that the contact of rough surfaces (such as a wheel and a rail) is of a discrete nature, plastic deformation of micro-protrusions occurs in the contact zone. In turn the plastic deformation of the material in the friction zone leads to the release of heat in it and, as a result, to an increase in the temperature in the contact zone. At the same time, it was found that an increase the temperature in the contact zone leads to a decrease in the physical and mechanical properties of the interacting bodies and a decrease in the traction capacity of the locomotive. It is established that in order to improve the traction capacity of locomotive, it is necessary to provide positive gradients of mechanical properties and temperature in the contact zone of the system wheel-rail. It is revealed that based on the conditions for ensuring the criterion of ultimate strength and improving the traction capacity of locomotives, the temperature should be limited in the contact zone of the working surfaces of the wheel and rail within 400...450 °C.

Keywords: *thermal process, traction capacity, temperature, dispersed layer of contamination, gradient of mechanical properties, temperature gradient, contact zone, wear, plastic deformation, friction coefficient, coefficient of adhesion*

Введение

Многочисленными исследованиями установлено, что основу механического износа составляют усталостные процессы, происходящие в области площадки контакта взаимодействующих тел [1, 2, 3, 4]. При взаимодействии колеса с рельсом происходит многократное нагружение площадки контакта колесно-рельсовой системы, сопровождающееся многократными микродеформациями сжатия и растяжения микронеровностей. В результате таких воздействий в поверхностном слое взаимодействующих тел накапливаются усталостные микрповреждения, приводящие к отделению частиц металла в виде продуктов износа, входящих в состав дисперсных загрязнений, которые И.В. Крагельский и Ю.М. Луж-

нов назвали «третьим» телом [1, 2].

Материалы и методы

Необходимо учесть, что качение колеса по рельсу непременно сопровождается процессом скольжения (чистое качение, исходя из механики процесса, практически невозможно реализовать). А наличие скольжения в сопровождении с высокими контактными напряжениями является причиной износа колесно-рельсовой системы локомотива.

Частицы металла, после отрыва от взаимодействующих поверхностей колеса и рельса, остаются в зоне площадки контакта и образуют слой поверхностного загрязнения (рис. 1, а) [1]. В связи с дискретным характером взаимодействия шероховатых поверхностей колесно-рельсовой системы, поверхностные загрязнения, могут заполнить имеющиеся пустотные промежутки между выступами микронеровностей и создадут возможность увеличения фактической величины площадки контакта между телами, существенным образом оказывая влияние на процесс сцепления колесно-рельсовой системы, (рис. 1, б) [1, 5, 6].

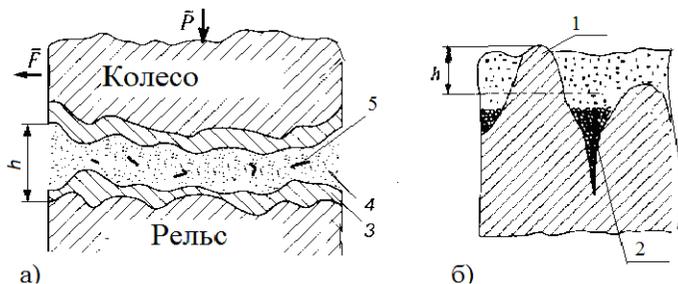


Рис. 1. Схема взаимодействия колеса с рельсом
в условиях наличия загрязнений [1]:

1 – выступ микронеровности; 2 – зона концентрации загрязнения (смазки) во впадине микронеровности; 3 – поверхностное загрязнение; 4 – дисперсный слой загрязнения; 5 – продукты износа;

h – усредненная толщина «третьего» тела; P – осевая нагрузка на колесо;
 F – тяговое усилие

Полученные в работах [7, 8] ВНИИЖТ результаты исследований позволяют утверждать, что в интервале температур 400–450 °С происходит интенсивный рост износа взаимодействующих поверхностей контактирующих материалов за счет пластического течения поверхностных слоев (рис. 2).

С увеличением температуры, в зоне трения дисперсный слой загрязнений будет упрочняться. При этом, на поверхностных слоях металлических поверхностей могут наблюдаться окислительные процессы, ухудшающие их механические свойства.

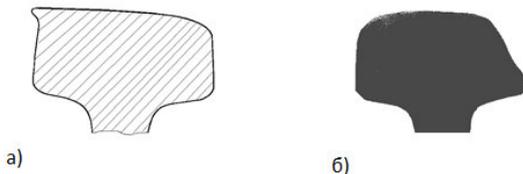


Рис. 2. Поперечное сечение рельса:
***a* – с пластической деформацией; *б* – с износом**
Составлено авторами

В результате пластической деформации взаимодействующих поверхностей в зоне площадки контакта выделяется теплота и, как следствие, повышается температура.

Есть возможность утверждать, что температура 400–450 °С, при трущихся, покрытых дисперсными загрязнениями взаимодействующих поверхностей колесно-рельсовой системы, может оказаться критической. В области, находящейся ниже этой температуры, реализуется положительный градиент механических свойств по глубине контакта трущихся тел, т.е.

$$d\tau/dz > 0, \quad (1)$$

где τ - предельное разрушающее напряжение в плоскости скольжения (т.е. – в дисперсном слое);

z – координата, перпендикулярная плоскости контакта колеса с рельсом.

Условие, выраженное формулой (1), является обязательным фактором для реализации процесса нормального протекания фрикционного контакта взаимодействующих поверхностей.

В области температур, превышающих уровень 400-450°С, дисперсный слой приобретает характеристики, превосходящие механические свойства материала колес и рельсов. При этом, в области площадки контакта начинает реализовываться отрицательный градиент механических свойств трущихся тел, т.е.:

$$d\tau/dz < 0, \quad (2)$$

При реализации температур данного диапазона (т.е.- выше 400 – 450 °С) дисперсному слою загрязнений приобретает свойства абразива. При этом, деформационные процессы смещаются в контактирующие

слои металла, в связи с чем данное обстоятельство становится основной причиной роста интенсивности износа материала колес и рельсов.

Следовательно, обязательным условием для снижения интенсивного износа колесно-рельсовой системы локомотивов должно являться обеспечение температуры в зоне контакта колеса с рельсом в диапазоне 400-450 °С.

Результаты

Выполненные выше исследования позволяют предположить, что прочность материалов в значительной степени зависит от температуры взаимодействующих поверхностей. Поэтому, необходимо отметить, что кроме градиента механических свойств, не менее важной характеристикой температурного режима процесса трения является градиент температуры по нормали к поверхности трения $d\theta/dz$, где z – координата в направлении нормали к поверхности трения. Как впервые доказал А.В. Чичинадзе [9, С. 322]: «... температурный градиент влияет на градиент механических свойств и вследствие этого на коэффициент трения и износ». В связи с этим, необходимым условием увеличения тяговой способности локомотивов должна быть реализация положительного температурного градиента по глубине контакта трущихся тел, т.е.:

$$d\theta/dz > 0, \quad (3)$$

Для условий взаимодействия рабочих поверхностей колесно-рельсовой системы в зоне площадки контакта температура может достигать до 1000 °С и выше [7, 8, 9]. В исследованиях А.В. Чичинадзе установлено: «Интенсивность деформации и температура поверхностных слоев уменьшается по глубине, а температурный градиент в таких условиях может достигать 800...1000 °С/мм» [9].

Согласно молекулярно-механической теории внешнего трения и усталостной теории изнашивания твердых тел физико-механические характеристики и свойства материалов пар трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях от температуры [2, 5, 6]. Эти зависимости иллюстрируются графиками, показанными на рис. 3 [9].

Из рис. 3 следует, что зависимости коэффициента трения f и интенсивности износа I_n от температуры поверхности трения нелинейные.

Обсуждение

Исследованиями, выполненными в работах [1, 10], выявлено, что процесс сцепления колеса с рельсом сопровождается трением, происходящим в зоне контакта колесно-рельсовой системы, и определяется фрикционными особенностями поверхностей трущихся тел. В свою очередь, на фрикционные свойства колесно-рельсовой системы оказывают

влияние её конструктивно – технологические характеристики и погодноклиматические условия эксплуатации рельсового транспорта.

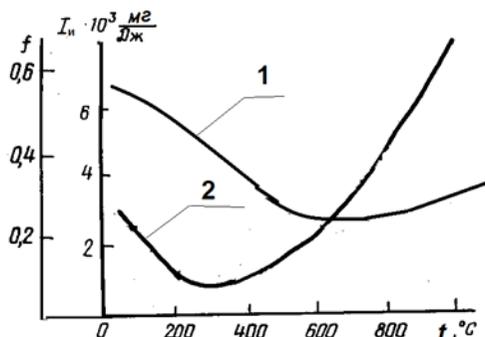


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения (1) и интенсивности износа (2) от температуры поверхности трения при трении колесной стали в паре с легированным чугуном ЧНМХ при вертикальной нагрузке 1,5 МПа [9]

Из графиков, представленных на рис. 3 следует, что с повышением температуры в зоне площадки контакта коэффициент трения понижается и при температуре около 500 °С достигает минимального значения. При дальнейшем повышении температуры коэффициент трения возрастает, но при этом ухудшаются прочностные характеристики взаимодействующих поверхностей. Примерно по такой же зависимости изменяется интенсивность изнашивания I и взаимодействующих тел.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для пары колесо – рельс основным критерием эффективного функционирования является, пропорциональный коэффициенту трения, коэффициент сцепления, который может быть обеспечен выбором рациональных значений градиентов механических свойств и температуры в зоне площадки контакта колесно-рельсовой системы.

Заключение

1. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что основным критерием эффективного функционирования колесно-рельсовой системы является, пропорциональный коэффициенту трения, коэффициент сцепления, который может быть обеспечен выбором положительных значений градиентов механических свойств и температуры в зоне площадки контакта.

2. Анализ графических зависимостей коэффициента трения и интенсивности износа от температуры взаимодействующих поверхностей колесно-рельсовой системы позволяет сделать вывод, что для обеспечения рациональных эксплуатационных характеристик рельсового транспорта следует ограничить температуру в зоне площадки контакта взаимодействующих поверхностей колеса и рельса в диапазоне 400...450°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лужнов, Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. - М.: Интекст, 2009. -176с.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
3. Гаркунов, Д.Н. и др. Водородное изнашивание пары трения колесо-рельс железнодорожного транспорта // Эффект безызносности и триботехнологии. - 1988. - № 1. - С.3-11.
4. Шпеньков, Г.П. Физикохимия трения (Применительно к избирательному переносу и водородному износу). - Минск: БГУ, 1978. - 204с.
5. Справочник по триботехнике // Под ред. М. Хебды и А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989. - Т. 1.- 400с.
6. Чичинадзе, А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. – М.: Наука, 1967. - 231 с.
7. Лужнов, Ю.И. Методы химического и электроискрового воздействия на поверхности трения железнодорожных рельсов. – В кн.: Фрикционные свойства железнодорожных рельсов. – М.: Наука, 1967.
8. Ларин, Т.В. Исследование механического износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатанных колес // Тр. ВНИИЖТ. - 1977. Вып. 581. - С.51 – 68.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для техн. вузов / Под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Центр «Наука и техника», 1995. - С. 322.
10. Демкин, Н.Б. Контактное трение шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. – 227 с.
11. Исаев, И.П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами / И.П. Исаев, Ю.М. Лужнов. – М.: Машиностроение, 1985. - 238 с.

УДК 621.893

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ В ПАРЕ С КЕРАМИЧЕСКИМ КОНТРТЕЛОМ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ И ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ

В.Д. Самусенко¹,
И.А. Буяновский¹, д-р техн. наук
В.А. Левченко², канд. физ.-мат. наук

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благодорова Российской академии наук

² Университет Тайчжоу, Китай

Представлены результаты исследования трибологических свойств алмазоподобного покрытия при трении по керамическому контртелу как без смазочного материала, так и при смазывании полиальфаолефиновым маслом ПАО-4. Для сравнения приведены результаты испытаний по керамическому контртелу образца без покрытия и с покрытием алумонитрид титана, использованным как промежуточный слой при нанесении алмазоподобного покрытия. Испытания показали, что керамический шар разрушает покрытия в процессе испытаний, что приводит к потере исследуемым трибосопряжением антифрикционных свойств, при этом алмазоподобное покрытие обеспечивает более высокую износостойкость поверхности.

Ключевые слова: DLC, алумонитрид титана, алмазоподобные покрытия, антифрикционные свойства, коэффициент трения, износ, керамическое контртело.

ANTIFRICTION PROPERTIES OF DIAMOND-LIKE COATING PAIRED WITH CERAMIC COUNTERBODY UN- DER DRY FRICTION AND BOUNDARY LUBRICATION

V.D. Samusenko¹,
I.A. Buyanovsky¹, Doctor of Technical Sciences
V.A. Levchenko², Candidate of Physical and Mathematical Sciences

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy
of Sciences

² Taizhou University, China

Results of investigation of tribological properties of diamond-like coating at friction by ceramic counterbody both without lubricant and when lubricated with polyalphaolefin oil PAO-4 are presented. For comparison, the results of the ceramic counterbody test of the uncoated sample and the titanium aluminonitride coating used as an intermediate layer in the diamond-like coating are shown. Tests have shown that the ceramic ball breaks the coatings during the test, resulting in loss of antifriction properties by the tribostitution under investigation, with the diamond-like coating providing higher surface wear resistance.

Keywords: *DLC, titanium aluminonitride, diamond-like coatings, antifriction properties, friction coefficient, wear, ceramic counter-heat.*

Введение

Алмазоподобные покрытия (DLC) обладают отличными трибологическими свойствами, однако в основном исследования их трибологических свойств проводится в паре со сталью [4]. Учитывая разнообразие материалов в современном машиностроении, представляет интерес поведение алмазоподобных покрытий в паре с различными материалами. В данном исследовании в качестве изнашивающего контртела был выбран керамический шар, обладающий высокой твёрдостью.

На основе предыдущих исследований [2], для испытаний было выбрано алмазоподобное аморфное покрытие с нанесением его на промежуточный слой алюминитрида титана (AlTiN-DLC), как показавшее себя наилучшим образом по противоизносным свойствам.

Материалы и методы

В качестве образцов для нанесения покрытий использовались ролики размерами 8x8 мм из стали 100Cr6 (аналог стали ШХ-15), на цилиндрическую поверхность которых методом вакуумно-дугового осаждения (PVD-технологии) наносились исследуемые покрытия. Это физический метод нанесения покрытий в вакууме, с помощью конденсации на подложку материала из плазменных потоков, возникающих на катодемисени в катодном пятне вакуумной дуги. [3] Толщина покрытия AlTiN-DLC составляет приблизительно 1,4 мкм, из которой на долю алмазоподобного покрытия приходится примерно 0,4 мкм.

Исследовались образцы без покрытия, с покрытием алюминитрид титана (AlTiN), и алмазоподобным покрытием с промежуточным слоем алюминитрида титана (AlTiN-DLC).

Измерение нанотвёрдости и модуля упругости покрытий выполнялось на НаноСкан-4D. Твёрдость измерялась в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.748-2011. Индентор – трёхгранная алмазная пирамида

Берковича. Время нагружения и разгружения 10 сек. Результаты проведенных измерений характеристик поверхности образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики поверхности образцов

Характеристика	Образцы		
	Сталь	AlTiN	AlTiN-DLC
Средняя шероховатость Ra , нм	86	80	57
Глубина вдавливания, нм	184 ± 16	138 ± 12	114 ± 12
Твёрдость H , ГПа	$9.4 \pm 1,5$	18.0 ± 2.4	41 ± 9
Модуль упругости E^* , ГПа	250 ± 31	264 ± 40	440 ± 80

Трибологические испытания проводились на лабораторной установке КТ-2 по схеме трения «вращающийся шар – три ролика» [1]. В качестве образцов для испытаний, использовали стандартные шарики диаметром 12,7 мм из нитрида кремния (степень точности G100), и ролики из стали 100Cr6 размером 8x8 мм, на цилиндрическую поверхность которых нанесли исследуемые покрытия. Шпиндель машины с зажатым в нём шариком под нагрузкой 108 Н прижимается к цилиндрическим поверхностям роликов, сложенных равносторонним треугольником, которые установлены в оправке в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя. Частота вращения шпинделя с шаром составляет 1 мин⁻¹. Продолжительность испытания каждого комплекта образцов составляла 60 минут. В процессе исследования регистрируются значения момента трения, оцениваемые по углу закручивания торсионного динамометра. Результаты испытаний представляются в виде зависимостей коэффициента трения от продолжительности испытаний. Испытания образцов проводили как без смазочного материала, так и в полиальфаолефиновом масле ПАО-4 ($v_{100} = 4 \text{ мм}^2/\text{с}$). После окончания каждого испытания фотографировались пятна износа.

Результаты

На рис. 1 и 2 приведены результаты трибологических испытаний образцов без смазочного материала. Как видно из рис. 1 значения коэффициента трения после стабилизации на уровне 0,85 при испытании образца без покрытия и с покрытием AlTiN близки, что говорит о разрушении покрытия (что видно из рис. 2, б) и переходе к трению в контакте керамика по стали, что и выражается в аналогичных значениях коэффициента трения. В случае с покрытием AlTiN-DLC мы имеем постепенное

разрушение покрытия в процессе трения, что отражается в постепенном росте значения коэффициента трения на протяжении всего испытания.

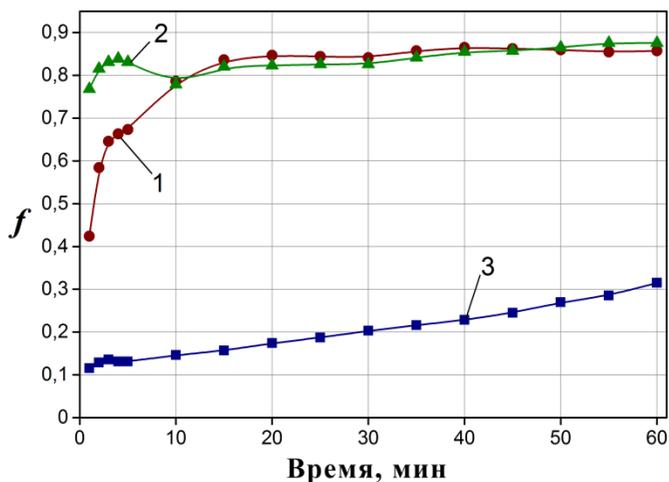
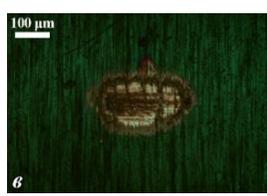
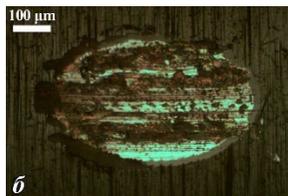


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний без смазочной среды керамического шара по:
1 – стали, 2 – AlTiN, 3 – AlTiN-DLC

Износ образцов при испытаниях без смазочного материала значительный, как на поверхности ролика, так и керамического шара (рис. 2). Износ образцов при их испытании без покрытия и с покрытием AlTiN похож по характеру. Нанесение дополнительного слоя в виде DLC уменьшает износ как шара, так и ролика. По фотографиям дорожек износа на керамическом шаре видно что происходит перенос материала ролика на поверхность керамического шара (рис. 2, *z-e*).



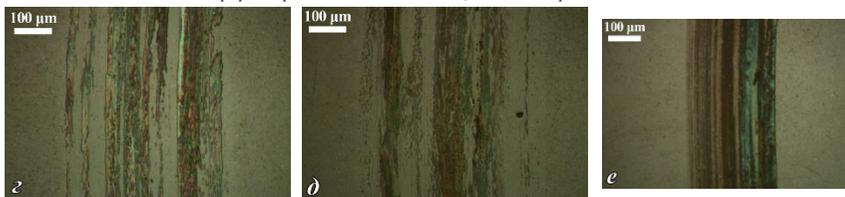


Рис. 2. Микрофотографии пятен износа на роликах (а, б, в) и дорожки износа на керамическом шаре (z, d, e) при испытании без смазочного материала образца из стали без покрытия (а, z), с AlTiN (б, d), с AlTiN-DLC (в, z)

На рис. 3-4 приведены результаты трибологических испытаний образцов в ПАО-4. Значения коэффициента трения (рис. 3) при испытаниях со смазочной средой снижаются по сравнению с испытаниями в сухую, хотя всё равно происходит разрушение покрытий (рис. 4).

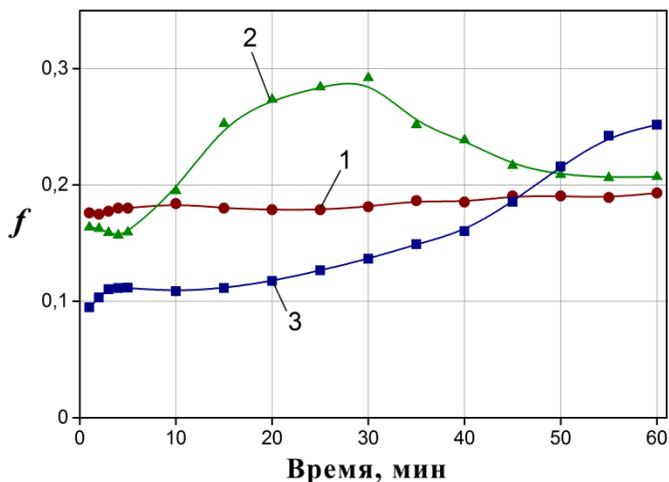


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний в ПАО-4 керамического шара по: 1 – стали, 2 – AlTiN, 3 – AlTiN-DLC

При испытании керамического шара со сталью коэффициент трения остается стабильным на протяжении всего испытания 0,18-0,19. При испытании ролика с покрытием AlTiN коэффициент трения возрастает, а затем снижается, что видимо связано с процессом разрушения покрытия, т.е. в процессе разрушения покрытия на поверхности образуются абра-

живные частицы, что способствует увеличению коэффициента трения, а в дальнейшем по мере удаления этих частиц из зоны контакта и увеличения пятна износа значения коэффициента трения снижаются до значений, аналогичных полученным в паре керамика-сталь.

При испытании покрытия AlTiN-DLC в ПАО-4 происходит процесс, аналогичный наблюдаемому при испытании без смазочного материала – постепенное увеличение коэффициента трения в результате разрушения покрытия, но несколько более умеренно. К концу испытания в ПАО-4 коэффициент трения достигает значения 0,25, в то время как без смазочного материала 0,31.

При трении в смазочной среде ПАО-4 износ образцов уменьшается, как покрытий, так и самого шара (рис. 4). При испытании со сталью керамический шар почти не изнашивается, на его поверхности наблюдаются лишь незначительные повреждения поверхности. Несколько больший износ керамического шара наблюдается при испытании покрытия AlTiN. При испытании покрытия AlTiN-DLC износ керамического шара хорошо заметен; также наблюдается перенос материала покрытия на поверхность керамического шара (рис. 4,е).

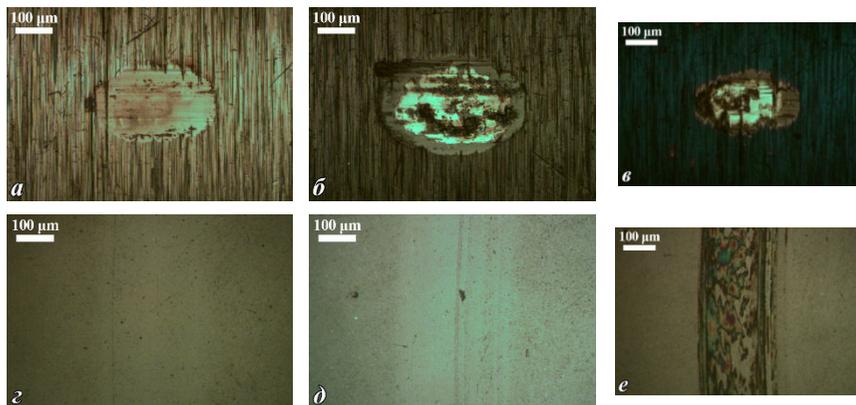


Рис. 4. Микрофотографии пятен износа на роликах (а, б, в) и дорожки износа на керамическом шаре (г, д, е) при испытании в ПАО-4 образца из стали без покрытия (а, г), с AlTiN (б, д), с AlTiN-DLC (в, е)

Обсуждение

Испытания покрытий показали, что при изнашивании исследуемых образцов керамическим шаром наблюдается износ и разрушение

покрытий как AlTiN, так и AlTiN-DLC, что при изнашивании стальным шаром имеет место только применительно к покрытию AlTiN без смазочного материала, тогда как во всех остальных случаях испытаний оба покрытия хоть и повреждались, но не происходило их разрушения [1]. Испытания с керамическим шаром в качестве контртела приводят к разрушению покрытий во всех случаях, причём покрытие AlTiN разрушается быстрее, а дополнительный нанесенный слой алмазоподобного покрытия разрушается постепенно, что видно из графиков со значениями коэффициентов трения.

Обращает на себя внимание тот факт, что перенос материала на поверхность керамического шара при сухом трении во всех случаях чётко виден на фотографиях, а при испытании в смазочной среде перенос материала на поверхность керамического шара происходит только при испытании алмазоподобного покрытия.

Заключение

Твёрдое контртелo может разрушать покрытия, что приводит к их повышенному износу и к ухудшению антифрикционных свойств трибосопрежения, заеданию и выходу из строя узла трения. Поэтому подбор материалов трущихся тел для создания долговечных и энергоэффективных трибологических систем требует особого внимания.

Алмазоподобные покрытия представляют определенные преимущества по трибологическим свойствам, что особенно заметно при наиболее жёстких условиях сухого трения.

Разнообразие используемых материалов в современном машиностроении, даёт большое пространство для исследований их взаимодействия в системе поверхность – смазочный материал – поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко, В. А., Буяновский, И. А., Самусенко, В. Д., Матвеев, В. Н., & Щербаков, Ю. И. (2019) Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия и алюмонитрида титана в модельных смазочных средах. *Трениеиизнос*, 40(6), 706-711.
2. Buyanovskii, I. A., Samusenko, V. D. & Levchenko V. A. (2020) Application of titanium nitride and titanium aluminonitride as intermediate layer for diamond-like coatings of steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 996(1), 012008.
3. Inceptor, A. & Salvador P. A. (2014) *Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. Surface and Coatings Technology*, 257, 138-153.
4. Tyagi, A., Walia, R. S., Murtaza, Q., Pandey, S. M., Tyagi, P. K., & Bajaj, B. (2019) A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications. *In-*

УДК 621.89

ТРИБОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ИНТЕНСИФИКАЦИИ "ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА" И РЕШЕНИЯ "ВЕЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ ТРЕНИЯ" В ЭКОНОМИКЕ

А.А. Кострюков^{1,2,3},
А.В. Щедрин^{1,3}, канд. техн. наук
Н.Ю. Чихачёва³

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана

²АО "Демиковский машиностроительный завод"

³МОО "Академия проблем качества"

В работе представлены результаты исследования влияния совместного использования регулярного микрорельефа поверхности контактирующих тел и смазочных материалов с многофункциональной металлоплакирующей присадкой «ВАЛЕНА». Данные триботехнологии в перспективе позволят решить "вечную проблему трения и износа" в экономике и экологии РФ.

***Ключевые слова:** присадки, смазочные материалы, эффект Ребиндера, эффект безызносности при трении, трибология.*

TRIBOLOGY BASED ON SELF-ORGANIZATION AS A FUNDAMENTAL BASIS FOR INTENSIFYING THE "REBINDER EFFECT" AND SOLVING THE "ETERNAL PROBLEM OF FRICTION" IN THE ECONOMY

A.A. Kostryukov^{1,2,3},
A.V. Shchedrin^{1,3}, Candidate of Technical Sciences
N.Yu. Chikhacheva³

¹Bauman Moscow State Technical University

²JSC "Demikhovsky Machine-Building Plant"

³IPO "Academy of Quality Problems"

The work presents the results of the study of the effect of the combined use of a regular microrelief of the surface of contacting bodies and lubricants with the «VALENA» multifunctional metal-sealing additive. These tribotechnologies in the future could

solve the "eternal problem of friction and wear" in the economy and ecology of the Russian Federation.

Keywords: *additives, lubricants, Rebinder effect, frictional wearless effect, tribology.*

Как свидетельствует научная и промышленная статистика - ежегодные мировые потери от трения и износа составляют затраты, сопоставимые с внутренним валовым продуктом промышленно развитых стран [1,2]. Дополнительно, трение и износ - основные причины преждевременного снятия оборудования и инструмента с эксплуатации, включая крупные техногенные аварии с большим количеством человеческих жертв и увечий (авария на Саяно-Шушенской ГЭС) [3]. Специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана, А.О. "ДМЗ" и МОО "АПК» с применением алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации» системно синтезированы природоподобные способы интенсификации "эффекта Ребиндера" при эксплуатации узлов трения и механической обработке металлов [1, 4, 5]. Данные принципиально новые научные направления и решения "вечных проблем трения и износа" базируются на фундаментальных научных открытиях выдающегося российского ученого профессора Дмитрия Николаевича Гаркунова (24.11.1919-28.05.2021 г.): "эффект безызносности при трении" и "водородный износ металлов" (дипломы на научные открытия СССР №№ 41, 378, патент РФ на изобретение открытого доступа № 2277579). В частности, супер интенсификация "эффекта Ребиндера" и непрерывное образование в очаге деформации ("третьем теле") мощной защитной ("сервовитной") пленки осуществляется за счет совместного использования регулярной микрогеометрии - регулярного микрорельефа (РМР) поверхности контактирующих тел и различных технологий применения штатных смазочных материалов с добавкой многофункциональной металлоплакирующей присадки под торговой маркой "ВАЛЕНА" (выпускается ООО "МОТОР-ЛАЙФ", г. Санкт-Петербург), реализующей "эффект безызносности при трении" и защиту от опасного вида "водородного износа металлов"(рис. 1, 2).



Рис.1 Деформирующий элемент для дорнования отверстий по патенту РФ №2560477 с PMP поверхности и износостойким покрытием.

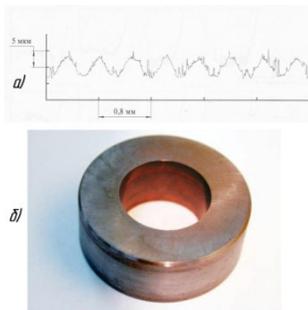


Рис. 2. Деформирующая фильера с PMP поверхности рабочего канала, полностью покрытая «сервоитной плёнкой» после волочения в среде металлолакирующей смазки.

Как показали выполненные лабораторные исследования и промышленное внедрение - это позволяет достичь следующих технико-экономических показателей: снижение энергопотребления при пластическом контакте до 72 %; повышение долговечности ответственных узлов трения гражданской техники и вооружения до 2-х раз; снижение вредных автомобильных выхлопов в атмосферу ("углеродная проблема") до 5 раз; повышение коэффициента полезного действия до 80 %; снижение саморазогрева штатной смазки до 35 %; снижение расхода горюче-смазочных материалов до 23 % (масел до 35 %); безразборное восстановление узлов трения за счет непрерывного образования в контакте защитной пленки толщиной до 2 мкм [6-9]. Выполненные разработки защищены патентами РФ на изобретения №№ 2063861, 2261781, 2475348, 2560475, 2560477, 2593062, 2647057, 2380201 и др., а также удостоены следующих наград: Премия Правительства РФ в области науки и техники; Премия Президента РФ в области образования; Золотая медаль Международного Совета по трибологии, учрежденная Королевой Великобритании Елизаветой Второй. В настоящее время данные триботехнологии в виде присадки "ВАЛЕНА" активно поставляются в страны Евросоюза и в перспективе позволят решить "вечную проблему трения и износа" в экономике и экологии РФ, обладающей крайне изношенными основными фондами и входящей в период широкой полосы техногенных аварий и катастроф [10].

Дополнительно, применительно к механической обработке металлов выявлено новое феноменальное явление - существенное увеличение энергосилового эффекта с ростом степени деформации обрабатываемой заготовки детали. Это объясняется тем, что при регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки в ней формируются развитые дислокационные структуры, существенно ускоряющие химические реакции с поверхностно-активными компонентами штатных смазочных материалов с оптимальным содержанием многофункциональной инновационной присадки “ВАЛЕНА”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гаркунов, Д.Н. и др. Трибология на основе самоорганизации. - Германия: LAMBERT, 2015. - 245 с.
2. Гаркунов, Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородный износ металлов / Перевод с англ. - Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007. - 384 с.
3. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. - Изд-во МСХА, 2003. - 344 с.
4. Щедрин, А.В. Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов / А.В. Щедрин, А.А. Кострюков, Н.Ю. Чихачёва // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2015. - № 6. - С. 20-26.
5. Трибологическая концепция системного анализа-синтеза методов деформирующей - режущей обработки / А.В. Щедрин и др. // Техника машиностроения. - 2001. - № 4(32). - С. 53-59.
6. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2019. - № 6. - С.18-25.
7. Влияние состава металлоплакирующей смазки и технологии её применения на контактные характеристики методов комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т.16. - № 11. - С. 504-510.
8. Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования заготовок из алюминиевых сплавов / А.А. Кострюков и др.// Упрочняющие технологии и покрытия. - 2018. - Т. 14. - № 7. - С.291-296.
9. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования методов комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2021. - Т. 22. - № 4. - С. 181-188.
10. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования / А.А. Кострюков и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - Т. 13. - № 11. - С. 495-499.

ОСОБЕННОСТИ НАГРУЖЕННОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ W-ОБРАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИЦЕПНЫМИ ШАТУНАМИ

А.П. Маслов¹, канд. техн. наук
М.А. Старунский¹,
Ю.В. Рождественский², д-р техн. наук, профессор
Е.А. Задорожная², д-р техн. наук, профессор
М.В. Левцов²

¹ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК»

² Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Семейство двигателей W-образного типа отличается новым подходом к конструированию автомобильных силовых установок, особенностью которых является большое количество цилиндров. При этом такие двигатели характеризуются крайне небольшими размерами. Конструктивная особенность W-образного двигателя заключается в том, что расположение цилиндров может быть представлена как сдвоенное V-образное положение. При этом основная особенность нагружения трибосопряжений цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма W-образного двигателя с прицепными шатунами заключается в последовательном нахождении поршней секции в положении верхней мертвой точки. Главные шатуны на шатунной шейке расположены рядом в левом блоке цилиндров, а боковые шатуны крепятся к сергам главных шатунов и расположены в правом блоке цилиндров. Обеспечение работоспособности трибосопряжений во многом зависит от реальной нагрузки, действующей за весь период работы двигателя. В статье представлены результаты оценки нагруженности трибосопряжений коленчатого вала для различных вариантов организации работы секции. Результаты гидродинамического расчета показали, что гидродинамический режим трения в подшипниках обеспечивается. Это доказывает перспективность предлагаемой конструкции.

Ключевые слова: Двигатель внутреннего сгорания, прицепной шатун, трибосопряжение

PECULIARITIES OF LOADING OF TRIBO-CONJUNCTIONS OF W-SHAPED ENGINE WITH TRAILED CONNECTING RODS

A.P. Maslov¹, Candidate of Technical Sciences

M.A. Starunsky¹,

Yu.V. Rozhdestvensky², Doctor of Technical Sciences, Professor

E.A. Zadorozhnaya², Doctor of Technical Sciences, Professor

M.V. Levtsov²

¹ООО "Chelyabinsk Tractor Plant – URALTRAK"

²Южно-Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет), г. Челябинск

The W-engine family features a new approach to the design of automotive power equipment, a feature of which is a large number of cylinders. Moreover, such engines are characterized by extremely small dimensions. The design feature of the W-shaped engine is that the arrangement of the cylinders can be represented as a double V-shaped position. In this case, the main feature of loading the tribo-conjunctions of the cylinder-piston group and the crank mechanism of the W-shaped engine with trailed connecting rods is the sequential finding of the section pistons in the "top dead center" position. The main connecting rods on the connecting rod journal are located side by side in the left cylinder block, and the side connecting rods are attached to the main connecting rod shackles and are located in the right cylinder block. Ensuring the operability of tribo-conjunctions largely depends on the real load acting over the entire period of engine operation. The article presents the results of assessing the loading of the crankshaft tribo-conjunctions for various options for organizing the section operation. The results of the hydrodynamic calculation showed that the hydrodynamic friction regime in the bearings is ensured. This proves the promise of the proposed design.

Keywords: Internal combustion engine, trailer connecting rod, tribo-conjunctions

Введение

В конструкциях различных тепловых двигателей применение схемы кривошипно-шатунного механизма (КШМ) с прицепным шатуном имеет довольно широкое распространение для достижения большей мощности за счет большего количества цилиндров при меньших габаритных размерах и весе двигателя в целом. Известно, что при решении задачи достижения одинакового хода главного и прицепного поршней могут быть решения проблемы по обеспечению равномерной нагрузки и тепловой напряженности элементов двигателя, в том числе трибосопря-

жений коленчатого вала [1]. К основным проблемам применения схемы КШМ с прицепными шатунами можно отнести сформированное мнение о том, что одинаковый ход поршней обеспечить невозможно. Однако в работе [1] были сформулированы условия, при которых возможно достижение одинакового хода главного и прицепного поршней V-образного двигателя. Наряду с этим в работах [2, 3] были представлены методики, выполнена оценка и анализ ходов главного и прицепного поршней по предложенным авторами математическим зависимостям. Выполнен графический и аналитический анализ возможности обеспечения одинакового хода главных и прицепных поршней. Выполнено сравнение результатов теоретических расчетов с КШМ реального двигателя. Подтверждены условия, при которых возможна реализация одинакового хода главных и прицепных поршней V и W – образных двигателей с прицепными шатунами для нормальной и дезаксиальной схем КШМ.

Основной задачей, которая осталась нерешенной, является задача определения сил, действующих на элементы двигателя, в том числе на трибосопряжения коленчатого вала. Методика расчета сил и некоторый анализ действующих сил в КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами приведен в работе авторов [4].

Целью настоящей работы является определение сил, действующих на подшипник нижней головки шатуна W-образного двигателя с прицепными шатунами.

Материалы и методы

Представленная на рис. 1 конструкция кривошипно-шатунного механизма W-образного двигателя с прицепными шатунами, обладает рядом положительных свойств, которые получены за счет:

- снижения количества коренных опор, что позволяет уменьшить длину блок-картера коленчатого вала и головок блока с соответствующим снижением общего веса двигателя и уменьшением количество используемых деталей;

- снижения уровня механических потерь КШМ за счет уменьшения количества коренных опор с семи (для 12-и цилиндрического V-образного двигателя с прицепными шатунами) до четырех (для 12-и цилиндрического W-образного двигателя с прицепными шатунами) [2, 4];

- снижения производственных затрат на обработку деталей из-за уменьшения длины коленчатого вала, блок-картера и головок двигателя, а также за счет снижения количества коренных подшипников скольжения.

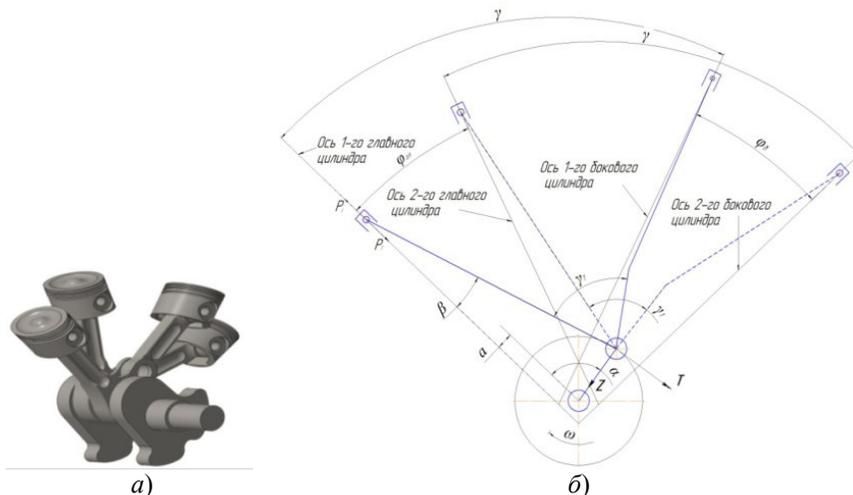


Рис. 1. Общий вид а) и кинематическая схема б) секции W-образного двигателя с прицепными шатунами
Составлено авторами

Как видно из рисунка, основная особенность W-образного двигателя с прицепными шатунами заключается в кинематической связи четырех поршней с одной шатунной шейкой, геометрическое расположение осей цилиндров которых, если смотреть со стороны носка коленчатого вала, образуют фигуру похожую на букву W латинского алфавита.

Для упрощения описания, детали, образующие эту фигуру, можно условно обозначить словом секция. Секция – это часть двигателя, включающая в себя два главных и два прицепных шатуна, кинематически связанные с одной шатунной шейкой.

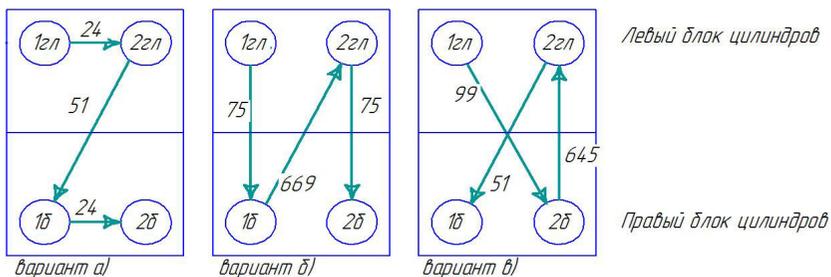
Как известно, продолжительность рабочего цикла в цилиндре двигателя составляет 720 град. ПКВ. Учитывая, что периодичность протекания рабочих процессов в цилиндрах секции зависит от конструктивных особенностей КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами, продолжительность рабочего цикла секции такого двигателя составит 819 град. ПКВ.

Еще одной особенностью данной конструктивной схемы является то, что в одной секции может происходить только:

- такт «Впуск» или такт «Рабочий ход» во всех четырех цилиндрах,
- такт «Впуск» в одном или двух цилиндрах, а в остальных такт «Рабочий ход».

Ситуация, когда в одних цилиндрах секции происходит такт «Рабочий ход», а в других такт «Сжатие» – невозможна из-за кинематической связи шатунов с шатунной шейкой, так как на основной части хода поршни могут двигаться или к, или от ВМТ (НМТ).

На рис. 2 представлены возможные схемы организации рабочего процесса 12-цилиндрового W-образного двигателя с прицепными шатунами: вариант *а)* – последовательная схема, *б)* – параллельная, *в)*– перекрестная.



Примечание: Стрелки характеризуют порядок начала такта «Рабочий ход», цифры значение угла ПКВ между цилиндрами.

Рис. 2 Варианты организации последовательности работы в секции двигателя
Составлено авторами

Рассмотренные варианты организации работы в секции двигателя, позволяют сделать предварительный вывод о преимуществах и недостатках рассматриваемых схем.

В качестве критерия оценки нагруженности трибосопряжений деталей ЦПГ и КШМ, за основу можно принять следующие условия, влияющие на тепловое или гидродинамическое состояние этих деталей:

- если такт «Рабочий ход» (вариант *а)* начинается с рядом расположенным цилиндром с интервалом 24 град. ПКВ, что составляет около 6 мм хода поршня, то тепловая напряженность деталей ЦПГ - существенно возрастает;

- если такт «Рабочий ход» (вариант *б)* начинается в первом или втором главных цилиндрах и через 75 град. ПКВ продолжается соответственно в первом или втором боковых цилиндрах, гидродинамическая напряженность деталей КШМ (шатунного первого или второго подшипника) – также существенно возрастет.

Соответственно и условий для обеспечения необходимого уровня

гидромеханических характеристик смазочного слоя сопрягаемых поверхностей для жидкостного режима трения в сопряжениях ЦПГ будет недостаточно. В тоже время, значительное силовое воздействие на сопрягаемые поверхности может быть выше допустимых значений прочностных и гидромеханических характеристик поверхностей скольжения. В этом случае, также условий для возникновения жидкостного режима трения для деталей КШМ будет недостаточно. В связи с вышеизложенным, оценка особенностей нагружений поверхностей трения является важным этапом исследований.

Особенность протекания рабочих процессов в секции W-образного двигателя с прицепными шатунами представлена на рис. 3. Как показано на рисунке, начало такта «Рабочий ход» в цилиндрах секции происходит в первом главном – при 360, во втором главном – при 384, в первом боковом – при 435 и во втором боковом при 459 градусов поворота коленчатого вала (град. ПКВ).

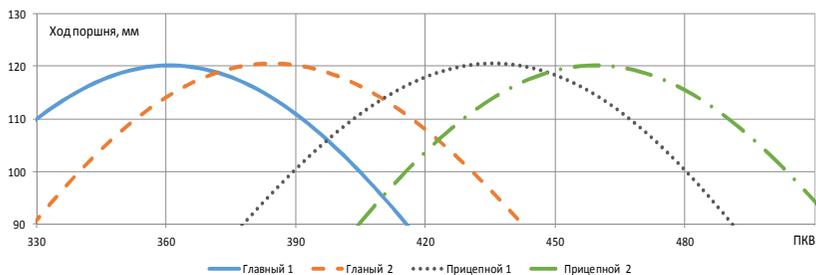


Рис. 3. Расположение поршней в ВМТ секции W-образного двигателя
Составлено авторами

Результаты

В качестве результатов расчета сил, действующих на шатунный подшипник, на рис. 4 и 5 представлены соответствующие годографы сил.

На рис. 4 представлен годограф тангенциальной силы (T) и нормальной силы (Z), действующей от радиуса кривошипа на первый шатунный подшипник скольжения от процессов, происходящих в первом главном и первом боковом цилиндрах.

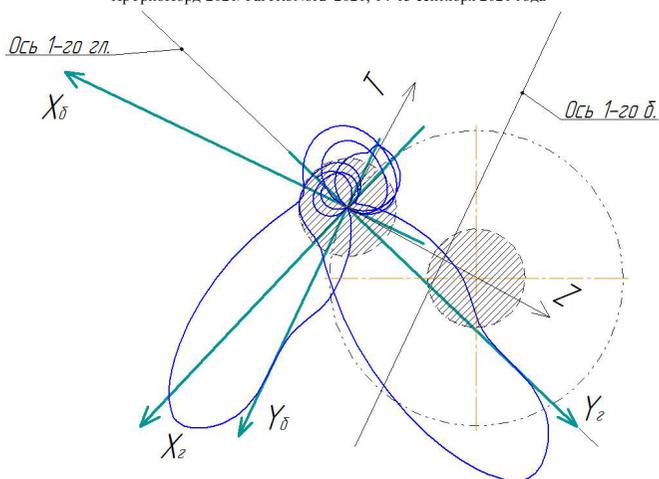


Рис. 4. Годограф силы « T от Z » первого шатунного подшипника секции двигателя
Составлено авторами

На рис. 5 представлен годограф тангенциальной силы (T) и нормальной силы (Z), действующей по радиусу кривошипа на второй шатунный подшипник скольжения от процессов, происходящих во втором главном и втором боковом цилиндрах.

Как было отмечено на рис. 1, *а*, на одной шатунной шейке параллельно расположено два шатунных подшипника, а на рис. 1, *б* представлена кинематическая схема взаимного расположения цилиндров W-образного двигателя с прицепными шатунами. Анализ характера действующих на шатунные подшипники сил показывает, что годограф действующих на шатунные подшипники сила (T) и (Z) повернуты относительно друг друга и этот разворот достаточно наглядно гармонируется с положением главного и прицепного шатунов во время работы.

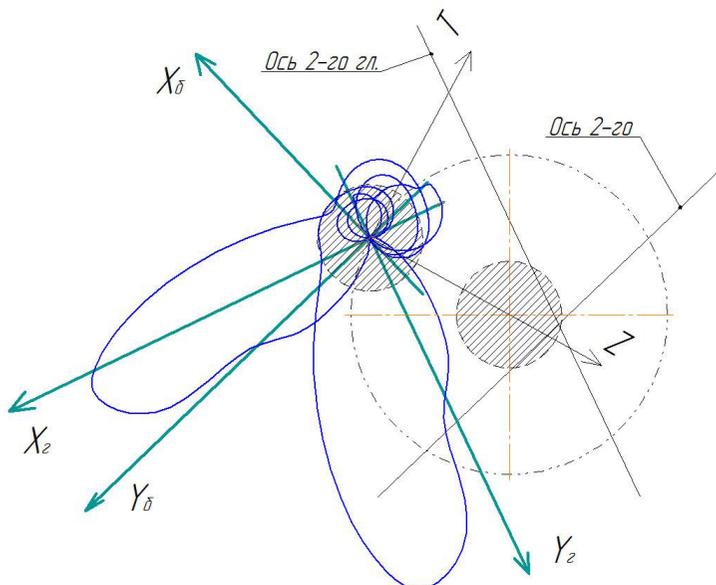


Рис. 5. Характер изменения годографа силы «Т от Z» второго шатунного подшипника секции двигателя
Составлено авторами

Полученные нагрузки были использованы для расчета динамики шатунных подшипников. В качестве результатов расчета получены гидромеханические характеристики подшипников скольжения, траектории движения центра шипа, а также распределение гидродинамических давлений в смазочном слое узла трения. На рис. 6 представлена зависимость минимальной толщины смазочного слоя от угла поворота коленчатого вала для первого шатунного подшипника секции двигателя.

Результаты расчета показали, что минимальная толщина смазочного слоя не опускалась ниже 2,9 мкм, что свидетельствует об обеспечении гидродинамического режима трения. При этом максимальные давления не превышали 236 МПа, а средние давления составили 55,9 МПа. Теплонапряженность подшипника за весь цикл нагружения равнялась 115 °С.

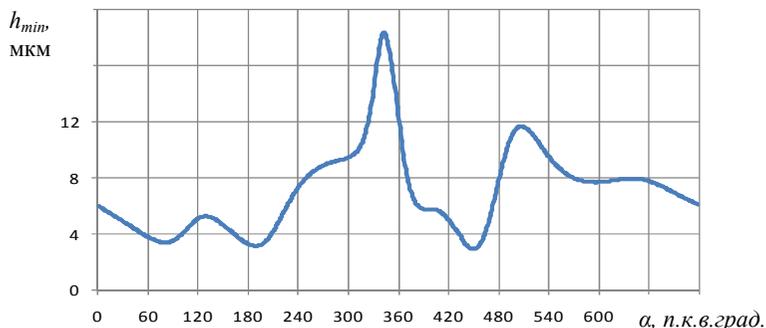


Рис. 6. Зависимость минимальной толщины смазочного слоя от угла поворота коленчатого вала
Составлено авторами

Заключение

Варианты организации работы секции двигателя влияют на характер нагружения деталей ЦПГ и КШМ, что необходимо учитывать при выборе схемы работы двигателя.

Анализ годографов действующих на шатунную шейку сил позволяет определить место подачи смазочного масла в зону подшипников и определить наиболее нагруженные зоны сопряжения. Результаты гидродинамического расчета показали, что действующие нагрузки и конструкция обеспечили гидродинамический режим трения в подшипниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман, И.Ш. Динамика и расчет на прочность авиационных моторов. (Справочник). Часть 1 – кинематика и динамика авиационных моторов. ОНТИ НКТП СССР. - М., Ленинград: Государственное авиационное автотракторное издательство, 1933. - С. 20–22.
2. Маслов, А.П. Кинематический и динамический анализ КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами / А.П. Маслов, М.В. Левцов // Двигателестроение. – 2019. – № 3(277). – С. 27 – 30.
3. Маслов, А.П. и др. Графоаналитический анализ возможности обеспечения одинакового хода поршней V- и W- образных двигателей с прицепными шатунами // Двигателестроение. – 2020. – №2. - С. 3–8.
4. Маслов А.П. Анализ действующих сил в КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами / А.П. Маслов, М.В. Левцов // Двигателестроение. – 2020. – № 1.–С.26–29.

УДК 665.765

УЛУЧШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТРИБОСИСТЕМЫ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМИ СМАЗОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Е.Н. Волнянко¹, канд. техн. наук, доцент
А.В. Тимошенко²

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, Беларусь

²Гомельское отделение Белорусской железной дороги.
Локомотивное депо. Гомель, Беларусь

В работе представлены результаты сравнительного исследования триботехнических характеристик экологически чистых смазочных материалов для гребнесмазывателей на основе растительных масел и традиционно используемых смазочных материалов на минеральной основе.

***Ключевые слова:** смазочные материалы, экология, рапсовое масло, железнодорожный транспорт, трибосистема.*

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF THE WHEEL-RAIL TRIBOSYSTEM WITH ENVIRONMENTALLY FRIENDLY LUBRICANTS

E.N. Volnyanko¹, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
A.V. Timoshenko²

¹Metal–Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Belarus

²Gomel branch of the Belarusian Railway. Locomotivedepot. Gomel, Belarus

The work presents the results of a comparative study of the tribotechnical characteristics of environmentally friendly lubricants for wheel flange lubricator based on vegetable oils and traditionally used mineral oil based lubricants.

***Keywords:** lubricants, ecology, rapeseed oil, railway transport, tribosystem*

Основное условие безопасности грузо- и пассажироперевозок – надежная работа трибосистемы «колесо-рельс», особенно на криволи-

нейных участках пути, где интенсивность изнашивания гребней колес и боковых граней наружной стороны рельсов наибольшая. Учитывая устойчивую тенденцию в глобальном масштабе к снижению экологической нагрузки на окружающую среду, наиболее перспективным направлением разработки смазочных материалов для лубрикации зоны контакта «колесо-рельс» является разработка органического экологически чистого СМ, пригодного для обработки гребней колесных пар и головок рельсового полотна.

Цель работы — исследование триботехнических характеристик смазочных материалов для гребнесмазывателей экологически чистых, на основе растительных масел.

Результаты сравнительного исследования триботехнических характеристик СМ на основе минеральных масел, традиционно используемых на Белорусской железной дороге, и экологически чистого (ЭЧ) СМ на основе рапсового масла показали, что:

- показатель износа узла трения при использовании ЭЧ СМ почти в два раза ниже по сравнению со СМ “АКС РЕЛЬСОЛ” и “АКС АГС”;

- температура в узле трения при использовании ЭЧ СМ составила около 47 °С, что значительно ниже, чем при использовании СМ “АКС РЕЛЬСОЛ” и “АКС АГС” – 79 °С и 91 °С соответственно.

Причем, выявлена стабильность триботехнических характеристик во времени, что позволило провести натурные испытания разработанного ЭЧ СМ. Натурные испытания провели в течение 3-х месяцев на тепловозе М62, в результате которых подтверждены выявленные закономерности. Установлено, что при загрузке в систему гребнесмазывания ЭЧ СМ, содержащего рапсовое масло, износ гребней колёс тепловоза оказался на 12% ниже, чем износ гребней колёс на тепловозе, который эксплуатировали с традиционно используемой смазкой “АКС-АГС” на минеральной основе.

УДК 620.178.16

ДЕФОРМАЦИОННО-ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Ю.И. Густов, д-р техн. наук
И.В. Воронина, ст. преподаватель

Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Представляется деформационно-топографический метод исследования триботехнических показателей на основе гипсоцентридной и склеробатической моделей трения и изнашивания металлических элементов трибосистем. Показана целесообразная возможность оценки и прогнозирования эксплуатационных характеристик, конструктивно-технологических способов повышения износостойкости и долговечности строительной техники.

***Ключевые слова:** деформация, топография, гипсограмма, склеробата, модели, трибосистема, износостойкость, долговечность*

DEFORMATION-TOPOGRAPHIC METHOD OF RESEARCH OF TRIBOTECHNICAL INDICATORS OF CONSTRUCTION EQUIPMENT

Yu.I.Gustov, Doctor of Technical Sciences
I.V. Voronina, Senior Lecturer

Moscow State of civil engineering (National Research University)

The deformation-topographic method for the study of tribotechnical indicators based on the gypsocentroid and sclerobatic models of friction and wear of the metal elements of the tribosystems is presented. The goal-oriented possibility of the deformation-topographic method for the study of tribotechnical indicators based on the gypsocentroid and sclerobatic models of friction and wear of the metal elements of the tribosystems is presented. The goal-oriented possibility of assessing and predicting operational characteristics, structural and technological methods to increase the wear resistance and durability of construction equipment is shown.

***Key words:** deformation, topography, gypsum, sclerobate, models, tribosystem, wear resistance, durability.*

Введение

Деформационно-топографический метод (ДТМ) основан и развивается на гипсоцентридной и склеробатической моделях изнашивания деталей триботехнических систем [1-4]. Гипсоцентридная модель описывает распределение микрометалла (выступов) по высоте микрорельефа изношенной поверхности трения в нормализованной системе координат «относительная опорная линия – относительное сближение $t_p-\varepsilon$ » (рис. 1). Склеробатическая модель изнашивания отражает трибodeформационные процессы упрочнения (разупрочнения) подповерхностных активных слоев вследствие фрикционного взаимодействия с сопряженными телами (рис. 2). Таким образом, первая модель характеризует внешнее состояние изношенных поверхностей трения, вторая – внутреннее подповерхностное состояние.

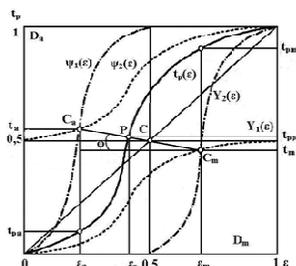


Рис. 1. Гипсоцентридная модель изнашивания [1]

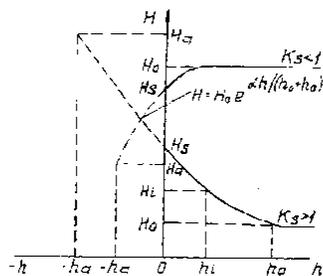


Рис. 2. Склеробатическая модель изнашивания [1]

Материалы и методы

В качестве исходных триботехнических показателей принимаются парциальные микроизнос (D_a) и микрометалл (D_m). Их числовые относительные значения определяются способами базовых опорных линий, площадей геометрических фигур, полюсных сближений, бицентридных отрезков [3-5]. В данной работе применен последний из них. Для построения системы $t_p-\varepsilon$ применялось ортогональное (поперечное и продольное) профилографирование поверхностей трения.

Способ бицентридных отрезков («правило отрезков») заключается в делении на длину бицентриды L_β отрезков, обращенных в область (D_a) или (D_m) (см. рис. 1);

$$D_a = C_a P / C_a C_m = C_a P / L_\beta, \quad (1)$$

$$D_m = C_m P / C_a C_m = C_m P / L_\beta \cdot \quad (2)$$

Коэффициент трения скольжения фрикционных элементов определяется зависимостью

$$f = (1 - D_a)^{1/D_a} = D_m^{1/D_a}, \quad (3)$$

Степень триботехнического упрочнения поверхности трения выражается зависимостью

$$K_s = H_s / H_0 = (D_{m\gamma} / D_m)^{D_m / D_a}, \quad (4)$$

где $D_{m\gamma} = 0,618$ – гармоническое значение парциального микрометалла в системе золотой пропорции [6].

Предельное трибдеформационное упрочнение (разупрочнение) продуктов износа определяется выражениями:

при $K_s > 1$

$$K_a = H_a / H_0 = K_s \left[K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5} \right], \quad (5)$$

при $K_s < 1$

$$K_a = H_a / H_0 = K_s \left[K_s^2 + (K_s - 1)^2 \right], \quad (6)$$

Температура на поверхности трения оценивается по зависимости:

$$\text{при } K_s > 1 \quad T_s = T_0 + \Delta T_s = T_0 + \ln K_s / \lambda, \quad (7)$$

$$\text{при } K_s < 1 \quad T_s = T_0 + \Delta T_s = T_0 - \ln K_s / \lambda, \quad (8)$$

где T_0 – температура окружающей среды, °C; ΔT_s – приращение температуры, °C; $\lambda = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ – среднее значение температурного коэффициента для металлических материалов в диапазоне $\lambda = 1,72 - 2,57 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [7].

Предельная температура продуктов износа может быть определена по формуле

$$T_a = T_0 + \Delta T_a = T_0 \pm \ln K_a / \lambda. \quad (9)$$

где знак (-) при $K_a < 1$.

Коэффициент полезного действия (КПД) фрикционных пар определяется выражением:

$$\eta = 1 / (1 + 2fL_\gamma / t_{pp}), \quad (10)$$

где $t_{pp} = 1 / (1 + 2D_a)$ – относительная опорная линия при полюсном сближении ε_p (см. рис. 1). Длина гипсограммы L_γ определяется инстру-

ментально (например, курвиметром КУ-А) или рассчитывается по формуле:

$$L_{\gamma} = 1,4142(D_{\max} / D_{\min})^{D_a \cdot D_m}, \quad (11)$$

где $D_{\max} = D_a$ при $D_a > D_m$, $D_{\min} = D_a$ при $D_a < D_m$.

Результаты и анализ исследования

Для ножей дорожной фрезы, наплавленных промышленными и опытными электродами, получены следующие триботехнические показатели (Таблица 1)

Таблица 1. Триботехнические показатели ножей дорожной фрезы

Материал	H_0 , МПа	D_a	K_s	K_a	f	$\Delta T_s, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	L_{γ}	η , %
Сталь 45	2250	0,55	1,51	2,93	0,234	192	500	1,486	40,2
110Г13Л	2400	0,60	1,37	2,44	0,217	146	415	1,559	39,1
И-1	6000	0,32	1,21	1,89	0,300	89	296	1,666	37,5
И-2	4450	0,44	1,26	2,06	0,268	107	336	1,500	40,0
Э-3	4600	0,42	1,20	1,85	0,274	85	286	1,530	39,5
СКБ	5000	0,41	1,19	1,72	0,276	81	252	1,544	39,3
ЦН-16	5500	0,46	1,18	1,78	0,262	77	268	1,472	40,5
Т-620	8200	0,38	0,90	0,74	0,284	49	140	1,781	36,0
КБХ-45	10600	0,35	0,88	0,69	0,292	59	172	1,628	38,1
Х-5	11300	0,36	0,85	0,63	0,289	76	215	1,615	38,2
ПЛ-400Х38ГЗРТЮ	8000	0,49	0,95	0,87	0,253	24	65	1,428	41,2

Составлено авторами

По табличным результатам можно отметить следующее:

1. Из использованной номенклатуры материалов выявлены упрочняющиеся ($K_s > 1$) и разупрочняющиеся ($K_s < 1$) стали и сплавы. Конструкционные стали марок 45 и 110Г13Л испытывают существенное трибодетформационное упрочнение, сопровождающееся высокими фрикционными температурами поверхности и продуктов износа. Невысокие коэффициенты трения скольжения обеспечивают КПД на уровне 40 %. Большие значения парциального микроизноса D_a свидетельствуют о низкой абразивной износостойкости ножей.

2. Все наплавленные металлы со структурой первичных карбидов и боридов в ледебурите (электроды Т-620, КБХ-45, Х-5 и порошковая лента ПЛ-400Х38ГЗРТЮ) испытывают в разной степени трибодетформационное разупрочнение, близкое к $K_s=1,0$. Для этих сплавов характерны

невысокие фрикционные температуры, завышенные коэффициенты трения и менее 40 % значения КПД (исключение - порошковая лента с $\eta=41,2$ %). Небольшие значения микроизноса, обусловленные высокой технологической микротвердостью (H_0) и квазиравновесным разупрочнением ($K_s \rightarrow 1,0$), указывают на высокую абразивную износостойкость этих наплавов в условиях высокоскоростного резания грунтов.

Применительно к наплавленным пальцам шарниров черпающего аппарата строительных драг получены триботехнические показатели, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Триботехнические показатели шарнирных пальцев драги

Материал	H_0 , МПа	D_a	K_s	K_a	f	$\Delta T_s, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	L_γ	$\eta, \%$
ВСН-12	7500	0,58	1,333	2,308	0,224	133,7	389	1,530	39,5
ОМГ-Н	4700	0,55	1,255	2,039	0,233	105,6	331	1,486	40,2
ВСН-6	6200	0,594	1,306	2,215	0,219	124,2	370	1,550	39,2
ОЗШ-1	5600	0,584	1,214	1,899	0,223	90,2	298	1,536	39,4
ОЗИ-1	7300	0,598	1,164	1,727	0,218	70,6	254	1,556	39,1
НГ-2	6500	0,426	1,215	1,903	0,272	90,6	299	1,521	39,7
Х-5	10400	0,32	0,817	0,573	0,300	94,0	259	1,667	37,5
Т-620	6700	0,64	1,215	1,903	0,203	90,6	299	1,615	38,2
Т-590	9300	0,36	0,960	0,886	0,289	19,0	56,3	1,615	38,2
ОЗН-6	5300	0,48	1,240	1,998	0,256	100,0	322	1,443	40,9
ПП-Нп100Х4Г2АР	8400	0,54	1,290	2,160	0,237	118,4	358	1,472	40,5

Составлено авторами

По результатам таблицы 2 можно сделать следующие выводы:

Испытанные наплавленные сплавы делятся на упрочняющиеся и разупрочняющиеся. К упрочняющим относятся сплавы с исходной (технологической) микротвердостью в диапазоне $H_0=4700-8400$ МПа, степенью упрочнения $K_s=1,164-1,333$, парциальным микроизносом $D_a=0,426-0,640$, коэффициентом трения скольжения $f=0,203-0,272$ и приращением поверхностной фрикционной температуры $\Delta T_s=70,6-133,7^\circ\text{C}$.

С целью выбора рациональных износостойких сплавов для повышения долговечности ножей дорожных фрез, деталей шарниров и др. предусмотрен комплексный критерий механизма изнашивания $K_m = D_a L_\gamma$. Данный критерий может служить для идентификации механизма изнашивания по условиям:

- для микрорезания (МР) $0,887 \leq K_m \leq 0,942$,

- для малоциклового усталости (МЦУ) $0,618 \leq K_m \leq 786$,
- для многоциклового усталости (МнЦУ) $0,382 \leq K_m \leq 0,618$.

Граничные значения K_m согласуются с гармонической величиной универсальной системы золотой пропорции [6].

Из анализа значений K_m следует, что большей абразивной износостойкостью обладают ножи, наплавленные покрытыми электродами И-1, КБХ-45 и Х-5. Наплавленные ими поверхности разрушаются по механизму многоциклового усталости (МнЦУ) с низкой интенсивностью изнашивания. Наряду с этими электродами, рекомендуется опытная наплавка порошковой лентой ПЛ-400Х38ГЗРТЮ, позволяющей повысить производительность наплавки за счет автоматизации процесса. Наплавка рациональна изнашиванием по механизму малоциклового усталости (МЦУ) с невысокой интенсивностью. Electrodes КБХ-45 и Х-5 рекомендуются для наплавки ножей при фрезеровании насыпных грунтов, опытные электроды И-1 и порошковая лента – грунтов естественного уплотненного состояния.

Из числа шарнирных пальцев предпочтительны наплавленные электродами Х-5 и Т-590, изнашивающиеся по механизму многоциклового усталости (МнЦУ). Наряду с наплавкой этими электродами, рекомендуется автоматизированная наплавка опытной порошковой проволокой ПП-Нп100Х4Г2АР, обеспечивающей повышение производительности процесса и изнашивание по механизму малоциклового усталости (МЦУ). Предложенные наплавки удовлетворяют условиям изнашивания шарнирной пары в гидроабразивной среде по своему функциональному назначению.

Заключение

Деформационно-топографический метод исследования триботехнических показателей позволил разработать рекомендации по выбору эффективных конструктивно-технологических способов повышения износостойкости и долговечности рабочих органов дорожных фрез при высокоскоростном трении о грунт и подвижных шарнирных сопряжений черпающего аппарата строительных драг в условиях гидроабразивного изнашивания. Показаны эффективность ручной и автоматической электродуговой наплавки покрытыми электродами, порошковой лентой и порошковой проволокой.

Предложены апробированные взаимосвязи триботехнических показателей, критериев оценки механизмов изнашивания поверхностей и достоверности результатов исследования.

Разработанные способы повышения износостойкости ножей до-

рожных фрез нашли промышленное применение в дорожном строительстве, упрочненные шарниры строительных драг при дноуглубительных работах реки Москвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Густов, Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования: Монография. - М.: Московский строительный университет, МГСУ, 2011. - 192 с.
2. Густов, Ю.И. и др. Методология исследования трибомеханических показателей строительной техники // Механизация строительства. - 2011. - № 8. - С. 10-12.
3. Густов Ю.И. и др. Микротопографические показатели поверхностей трения строительных машин и оборудования // Вестник МГСУ. - 2013.- № 9. - С. 179-184.
4. Густов Ю.И. и др. Механизмы абразивного изнашивания и коэффициенты полезного действия строительной техники // Механизация строительства. - 2016. - № 9. - С 50-54.
5. Густов, Ю.И. и др. Трибологические показатели рабочих органов и сопряжений строительной техники // Интерстроймех-2015. - М.: КазГАСУ, 2015. - С. 68-73.
6. Коробко, В.И. Золотое сечение и проблемы гармонии систем. - М.: АСВ стран СНГ, 1998. - 374 с.
7. Физические величины: Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М., и др. - Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
8. Чихос, Х. Системный анализ в трибонике. - М.: Мир, 1982. - 352 с.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ ФРИКЦИОННЫХ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Г. Меликсетян, д-р техн. наук, доцент

Национальный политехнический университет Армении, Ереван

Представлены результаты исследования процессов высокотемпературного трения и износа тормозных фрикционных безасбестовых полимерных материалов. Показано, что существуют два основных аспекта влияния теплового режима на фрикционно-износные характеристики фрикционных безасбестовых полимерных материалов: изменение физико-механических свойств при низком тепловыделении фрикционного контакта до 280-350 °С; и изменения, обусловленные различными структурными превращениями и механохимическими процессами поверхностных слоев при высоком тепловыделении фрикционного контакта выше 350 °С. Выявлены механизм износа высокотемпературного трения и основные особенности протекающих механохимических и структурных изменений. Показано, что высокотемпературное трение фрикционных безасбестовых полимерных материалов протекает в многостадийном режиме механохимических изменений, сопровождающемся низкомолекулярным весовым пиролизом летучих продуктов, деструкцией связующего, деградацией армирующего элемента и карбонизацией поверхности трения, которые являются постоянно действующими факторами и при разработке новых экологически безвредных фрикционных материалов следует учитывать их влияние на трибологические характеристики фрикционной пары. Исследуемые материалы способны образовывать на поверхности трения контртела пленку фрикционного переноса в виде монолитного слоя или отдельных перенесенных фрагментов, ориентированных по направлению скольжения и способность образования пленки фрикционного переноса является важной характеристикой фрикционной пары. Вновь разрабатываемые материалы должны образовывать пленку фрикционного переноса на поверхности контртела при сравнительно высоких температурах, в область которых смещаются максимальные значения коэффициента трения. Установлено, что механизм высокотемпературного разрушения поверхностных слоев тормозных безасбестовых фрикционных материалов характеризуется аккумуляцией повреждений в подповерхностном слое и наиболее полно процесс высокотемпературного изнашивания объясняется концепциями усталостно-деламинационного разрушения.

Ключевые слова: безасбестовый материал, высокотемпературное трение, износ, замедление, коэффициент трения, механизм разрушения

FEATURES OF HIGH-TEMPERATURE FRICTION OF BRAKE FRICTION ASBESTOS-FREE POLYMER MATERIALS

N. G. Meliksetyan, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

National Polytechnic University of Armenia, Yerevan

Results of investigation of processes of high-temperature friction and wear of brake friction asbestos-free polymer materials are presented. It has been shown that there are two main aspects of the influence of the thermal regime on the friction-wear characteristics of friction asbestos-free polymer materials: change in physical and mechanical properties at low heat loading of the friction contact - up to 280-350 OS: and changes caused by various structural transformations and mechanical chemical processes of surface layers at high heat loading of the friction contact - above 350 OS. The mechanism of wear of high-temperature friction and the main features of the ongoing mechanochemical and structural changes were revealed. It has been shown that high-temperature friction of friction asbestos-free polymer materials occurs in a multi-stage mode of mechanochemical changes, accompanied by low-molecular weight pyrolysis of volatile products, destruction of the binder, degradation of the reinforcing element and carbonization of the friction surface, which are constantly acting factors and when developing new environmentally friendly friction materials, their influence on the tribological characteristics of the friction pair should be taken into account. The test materials are capable of forming a friction transfer film in the form of a monolithic layer or individual transferred fragments oriented in the sliding direction on the friction surface of the counterbody, and the ability to form a friction transfer film is an important characteristic of the friction pair. Newly developed materials should form a friction transfer film on the surface of the counterbody at relatively high temperatures, to the region of which the maximum values of the coefficient of friction are shifted. It has been found that the mechanism of high-temperature destruction of surface layers of brake asbestos-free friction materials is characterized by the accumulation of damages in the subsurface layer and the most complete process of high-temperature wear is explained by the concepts of fatigue-delamination destruction.

Keywords: *asbestos-free material, high-temperature friction, wear, deceleration, coefficient of friction, mechanism of destruction.*

Введение

Фрикционные безасбестовые полимерные материалы (ФБПМ) почти 25 лет успешно используются в тормозных устройствах различных машин и, в настоящее время, пока еще являются перспективными материалами для фрикционных накладок тормозных устройств.

Еще в 1980-х годах после принятия международных актов по запрету асбеста нами совместно с ВНИИАТИ (г. Ярославль, РФ) и ИММС (г. Гомель, Беларусь) проведены комплексные исследования в направле-

нии изучения работоспособности тормозных фрикционных материалов. Установлены основные закономерности высокотемпературного трения и изнашивания поверхностных слоев традиционных композиционных асбестовых фрикционных материалов. Эти исследования открыли новые перспективы для создания более работоспособных и, главное, экологически безвредных фрикционных материалов [1-4].

Однако, интенсификация движений, увеличение нагрузочных масс движущихся частей машин, повышение нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации транспортных средств и требования по обеспечению экологической безопасности окружающей среды непрерывно предъявляют новые и повышенные требования к фрикционным тормозным материалам. Вследствие этого применяемые в настоящее время фрикционные материалы не всегда удовлетворяют возросшим требованиям эксплуатации. Технический прогресс требует разработки новых высокоэффективных и в то же время экологически безвредных фрикционных материалов.

Цель работы. Исследование особенностей высокотемпературного (выше 350 °С) трения ФБПМ и разработка рекомендаций по созданию новых материалов.

Результаты и обсуждение

Для достижения поставленной цели в начале проводились исследования образцов из фрикционных безасбестовых тормозных материалов производства ведущих европейских фирм Textar, Bosch и ATE на лабораторной установке типа FM-9 по методике ГОСТРИСО 7881-94 (рис. 1).

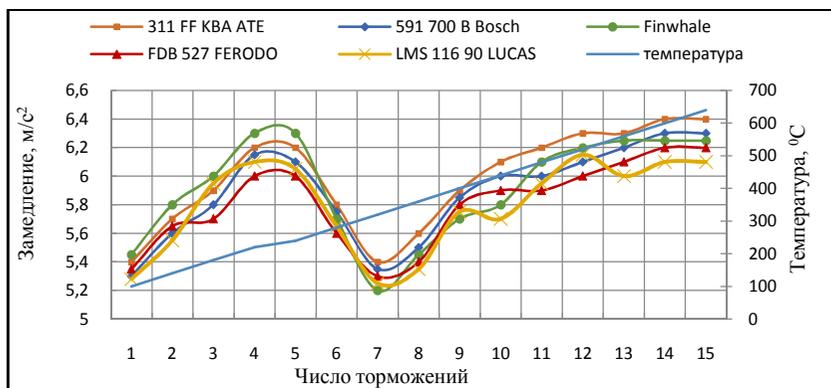


Рис.1. Зависимости коэффициента трения от температуры различных безасбестовых тормозных материалов при $P_a=2,0$ МПа, $V_{ск}=16,7$ м/с
Составлено автором

Как видно замедление (коэффициент трения) всех материалов с повышением температуры первоначально увеличивается и имеет максимальное значение при температурах 280...350 °С. Далее при увеличении поверхностной температуры замедление (коэффициент трения) уменьшается до минимального значения при 330...400 °С. При температуре выше 400 °С у всех материалов наблюдается повышение замедления (коэффициента трения). Во всех случаях зависимость замедления (коэффициента трения) материалов от поверхностной температуры выражается кривой, имеющей зону снижения в интервале 250...360 °С с переходом от сравнительно высокого трения до уровня, практически соответствующего трению при смазке.

Обобщенные результаты испытаний выбранных ФБПМ показывают, что при трении в зависимости от поверхностной температуры наблюдается общая закономерность для трибологических характеристик. Существуют два основных аспекта влияния теплового режима на трибологические характеристики ФБПМ: 1) изменение физико-механических свойств при низком теплонагружении фрикционного контакта (зона повышения замедления); 2) изменения, обусловленные различными механохимическими процессами и структурными превращениями поверхностных слоев при высоком теплонагружении фрикционного контакта (зоны уменьшения и повторного повышения замедления)[5].

Протекающие при высокотемпературном трении механохимические изменения изучались методами термогравиметрического и дифференциально-термического анализов образцов и продуктов износа, а процесс карбонизации - методами ядерно-магнитного резонансного и электронно-парамагнитного резонансного анализов. Существует общая закономерность механохимических изменений в поверхностных слоях исследуемых ФБПМ (табл. 1).

Таблица 1. Механизмы механохимических превращений

№	Механизм	Фрикционный материал		
		Textar	Bosch	ATE
		Температурная зона, °С		
I	Уменьшение прочности поверхностного слоя и низкомолекулярный весовой пиролиз летучих продуктов. Образование напряженно-деформированных зон	100-325	100-300	100-225
II	Деструкция связующего. Образование пленок фрикционного переноса. Увеличение неорганических соединений	325-450	325-450	225-450

	на поверхности трения.			
III	Разрушение армирующего элемента. Увеличение интенсивности термоокислительных процессов	450-725	450-725	450-725
IV	Карбонизация поверхности трения	выше 725		

Составлено автором

Высокотемпературное трение ФБПМ протекает в многостадийном режиме механохимических изменений, сопровождающемся низкомолекулярным весовым пиролизом летучих продуктов, деструкцией связующего, деградацией армирующего элемента и карбонизацией поверхности трения. Эти изменения, в целом, являются постоянно действующими факторами и определяют толщину поверхностного слоя ФБПМ, который по своим свойствам отличается от основного материала[6].

Структурные изменения поверхностей трения ФБПМ исследовались методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре марки ДРОН-2 путем изучения рентгенограмм поверхностей до и после трения, а также продуктов износа. Взаимосвязь температурных зон коэффициента трения со структурными и фазовыми изменениями представлена на рис. 2.

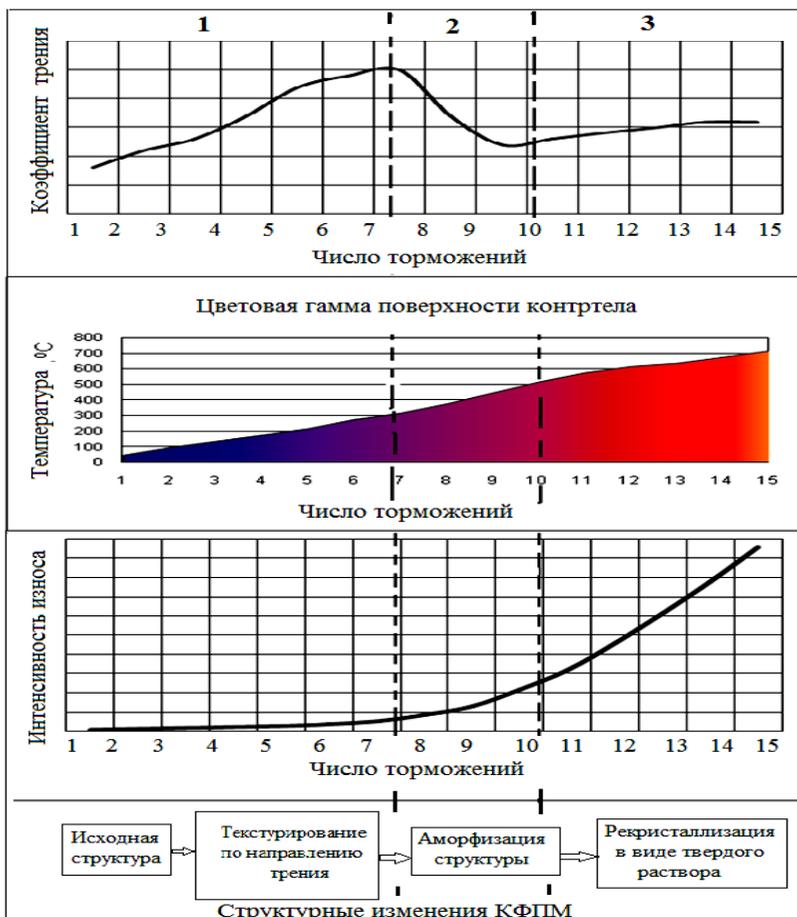


Рис. 2. Взаимосвязь температурных зон коэффициента трения и интенсивности износа со структурными изменениями
 Составлено автором

Для выявления агрегатного состояния поверхности трения, проводились РЭМ исследования поверхностей трения ФБПМ, металлических контртел и образовавшихся продуктов износа (рис. 3).

Субмикроскопический рельеф и агрегатное состояние поверхности трения ФБПМ, в основном, характеризуется двумя участками - выгла-

женными и заполненными мельчайшими частицами. Выглаженные участки отличаются своей монолитностью и ориентацией по направлению трения, а участки с заполненными мельчайшими частицами расположены хаотично и имеют гетерогенное состояние. Сравнение субмикроскопического рельефа и типа агрегатного состояния поверхностей трения образцов с классификационными характеристиками вторичных структур показывает, что в процессе высокотемпературного трения ФБП образовались вторичные структуры второго типа. Продукты износа в основном имеют форму лепестков и различаются размерами в зависимости от композиционного состава, что имеет место при деламационном разрушении поверхностей трения [7].

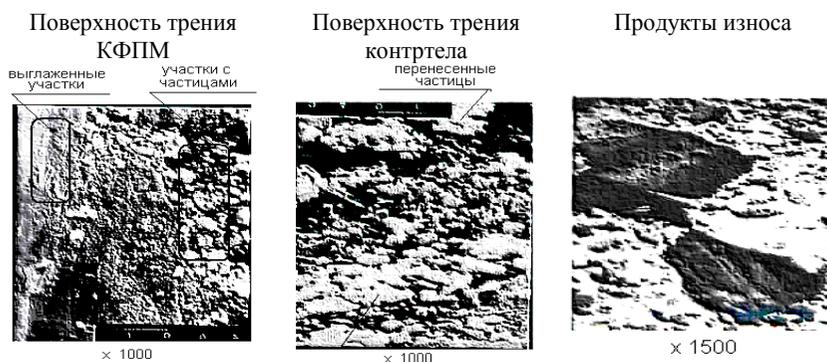


Рис. 3. Типичный вид поверхностей трения КФПМ, металлических контртел и продуктов износа
Составлено авторами

Все исследуемые ФБП способны образовывать на поверхности трения контртела пленку фрикционного переноса в виде монолитного слоя или отдельных перенесенных фрагментов, ориентированных по направлению скольжения. Способность образования пленки фрикционного переноса является важной характеристикой фрикционной пары. Вновь разрабатываемые ФБП должны образовать пленку фрикционного переноса на поверхности контртела при сравнительно высоких температурах, в область которых смещаются максимальные значения коэффициента трения.

Заключение

В условиях поверхностных температур выше 350 °С трение фрикционных бесасбестовых тормозных материалов по характеру отличается

от низкотемпературного трения. Непрерывное многократное фрикционное нагружение интенсивно пластически деформирует поверхностный слой, в котором происходят постоянно действующие термомеханические, механохимические и структурные превращения. Создаются определенные условия для образования микродефектов и зарождения в области их скопления микротрещин. Последние приводят к образованию лепестковых частиц износа, размеры и частота появления которых определяют интенсивность изнашивания материала. Переход процесса изнашивания материалов от умеренного к интенсивному с одновременным уменьшением коэффициента трения в условиях деструкции связующего, наличие процессов фрикционного переноса и сложное агрегатное состояние поверхности трения фрикционных материалов в температурной зоне, при котором наблюдается повторное повышение коэффициента трения в режиме интенсивного изнашивания указывают на то, что изменяется механизм разрушения поверхностных слоев и процесс разрушения невозможно объяснить, основываясь только на концепции усталостной теории изнашивания. Механизм высокотемпературного разрушения поверхностных слоев ФБПМ характеризуется аккумуляцией повреждений в подповерхностном слое и наиболее полно процесс высокотемпературного изнашивания ФБПМ объясняется концепциями усталостно-деламинационного разрушения поверхностей трения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы “Создание и исследование деталей машин и композиционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов” базовой проблемной лаборатории «Трибология» Национального Политехнического Университета Армении за 2014-2021 гг. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погосян, А.К. и др. Полимерная фрикционная пресскомпозиция. А.с. №1142488, СССР. 1985. Бюл. изобр. №8
2. Погосян, А.К. и др. Полимерная фрикционная пресскомпозиция. А.с. № 1224321, СССР. 1986. Бюл. изобр. № 14.
3. Погосян, А.К. и др. Композиция для получения фрикционного материала. Патент № 2260018. Россия. 2005. Бюл. изобр. № 25.
4. Погосян, А.К. и др. Фрикционные композиты на основе полимеров. – Минск: Информтрибо, 1992. - 218 с.
5. Меликсетян, Н.Г. Кинетика структурных и фазовых превращений поверхностных слоев тормозных фрикционных материалов // Проблемы механики. - Тбили-

- си, 2007. - № 4 (29). - С. 28-32. URL: <http://www.pam.edu.ge/>
6. Meliksetyan, N. The surface layers destruction of friction brake materials // Problems of Mechanics. Tbilisi. 2008, 2 (31), p. 54-58. URL: <http://www.pam.edu.ge/>
7. Suh, N.P. The Delamination Theory of Wear // Wear, 1973. (25). pp.111-124.

ВЛИЯНИЕ УГЛА УСТАНОВКИ ФРИКЦИОННОЙ НАКЛАДКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФРИКЦИОННОГО РОЛИКА НА ЕЕ ИЗНОС

Е.В. Сафронов, канд. техн. наук, доцент
А.Л. Носко, д-р техн. наук, профессор

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

Гравитационные стеллажи являются одним из типов блочного хранения грузов. При использовании тяжелых палетированных грузов необходимо обеспечить их движение с безопасной скоростью, не превышающей допустимых значений. Для этого используется тормозной ролик, одной из конструкций которого является центробежный фрикционный ролик, состоящих из планетарного мультипликатора, центробежного тормоза и фрикционной пары. В процессе работы центробежного фрикционного ролика происходит износ фрикционной накладки, вследствие чего увеличивается скорости движения грузов. На эффективность работы и срок службы центробежного фрикционного ролика оказывает влияние положение фрикционной накладки на тормозной колодке, определяемый углом ее установки. Ввиду неравномерности износа фрикционной накладки, характерного для всех колодочных тормозов, анализ влияния угла установки фрикционной накладки на ее износ является актуальной задачей. В статье приведены критерии максимального износа фрикционной накладки центробежного тормоза, а также с помощью геометрической модели проведен анализ влияния угла установки фрикционной накладки на её износ. Полученная зависимость массового износа фрикционной накладки носит нелинейный характер, а износ для разработанной конструкции достигает максимальных значений 1,7...1,75 г. При этом наиболее рациональное расположение фрикционной накладки на тормозном рычаге находится в диапазоне углов установки от 100 до 110°. Методика, описанная в работе, позволяет уточнить область рациональных значений углов установки накладки центробежного фрикционного ролика на тормозном рычаге, обеспечивающих наибольшую эффективность его работы и оценить максимальный износ фрикционной накладки центробежного тормоза.

Ключевые слова: Гравитационный стеллаж, тормозной ролик, центробежный тормоз

INFLUENCE OF THE ANGLE OF INSTALLATION OF THE FRICTION LINING OF THE CENTRIFUGAL FRICTION ROLLER ON ITS WEAR

E.V. Safronov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
A.L. Nosko, Doctor of Technical Sciences, Professor

Bauman Moscow State Technical University

Gravity racks are one of the types of block cargo storage. When using heavy palletized loads, it is necessary to ensure their movement at a safe speed that does not exceed the allowable values. For this purpose, a brake roller is used, one of the designs of which is a centrifugal friction roller, consisting of a planetary multiplier, a centrifugal brake and a friction pair. During the operation of the centrifugal friction roller, the friction lining is worn out, as a result of which the speed of movement of goods increases. The working efficiency and service life of the centrifugal friction roller is influenced by the position of the friction lining on the brake pad, determined by the angle of its installation. Due to the uneven wear of the friction lining, which is characteristic of all pad brakes, the analysis of the influence of the angle of installation of the friction lining on its wear is an urgent task. The article presents the criteria for maximum wear of the friction lining of the centrifugal brake, and also with the help of a geometric model, an analysis of the influence of the angle of installation of the friction lining on its wear is carried out. The obtained dependence of the mass wear of the friction lining is nonlinear, and the wear for the developed design reaches maximum values of 1.7...1.75 g. At the same time, the most rational location of the friction lining on the brake lever is in the range of installation angles from 100 to 110. The technique described in the paper allows us to clarify the range of rational values of the angles of installation of the lining of the centrifugal friction roller on the brake lever, which ensure the greatest efficiency of its operation and to estimate the maximum wear of the friction lining of the centrifugal brake.

Keywords: Flow rack, brake roller, centrifugal brake

Введение

Гравитационные стеллажи являются одним из вариантов блочного хранения грузов, позволяющих увеличить плотность хранения [2], сократить пробег погрузчиков [3], тем самым уменьшить время обработки грузов [1, 6]. Гравитационных стеллаж представляет собой установленные под углом на статическую металлоконструкцию роликовые полотна. При использовании грузов большой массы, таких как паллеты, возникает необходимость в ограничении скорости движения груза. В качестве одного из устройств безопасности, предотвращающих разгон груза, используется центробежный фрикционный ролик (далее ЦФР), состоящий из трех основных частей: мультипликатора, центробежного тормоза и фрикционной пары [8]. Схема центробежного тормоза представлена на рис. 1.

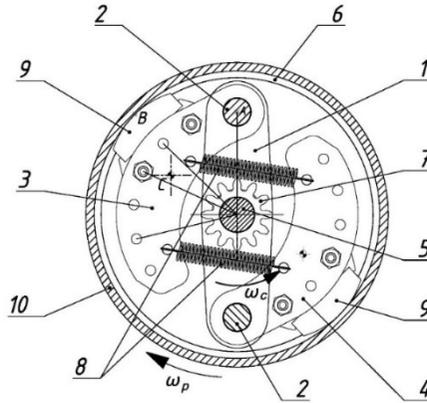


Рис. 1. Схема центробежного тормоза ЦФР:

- 1 – ступица; 2 – ось колодки; 3, 4 – тормозная колодка; 5 – неподвижная ось тормозной вставки; 6 – тормозная вставка; 7 – центральная шестерня; 8 – размыкающая пружина; 9 – фрикционная накладка; 10 – обечайка ЦФР
 Составлено авторами

Одним из параметров, влияющих на эффективность работы центробежного тормоза ЦФР, является угол β установки фрикционной накладки (рис. 2). При этом наибольшая эффективность достигается при установке фрикционной накладки близко к краям рабочего диапазона углов установки [5].

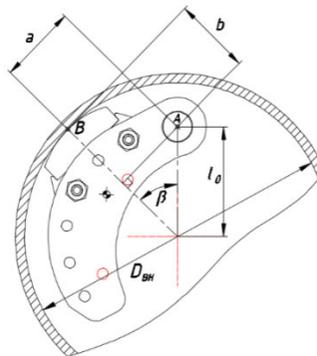


Рис. 2. Схема определения положения фрикционной накладки углом установки β (пружины не показаны)

Составлено авторами

Износ фрикционной накладки центрбежного тормоза ЦФР увеличивает скорость движения паллеты по роликовому полотну ЦФР, которая не должна превышать допустимых значений в процессе эксплуатации гравитационных стеллажей [4]. При этом ввиду неравномерности износа, что является характерной чертой колодочных тормозов [7], определение рациональных значений угла установки является актуальной задачей.

Целью данной работы является анализ влияния угла установки фрикционной накладки на ее износ.

Материалы и методы

В процессе линейного износа Δh фрикционной накладки происходит изменение положения тормозной колодки, как показано на рис. 3.

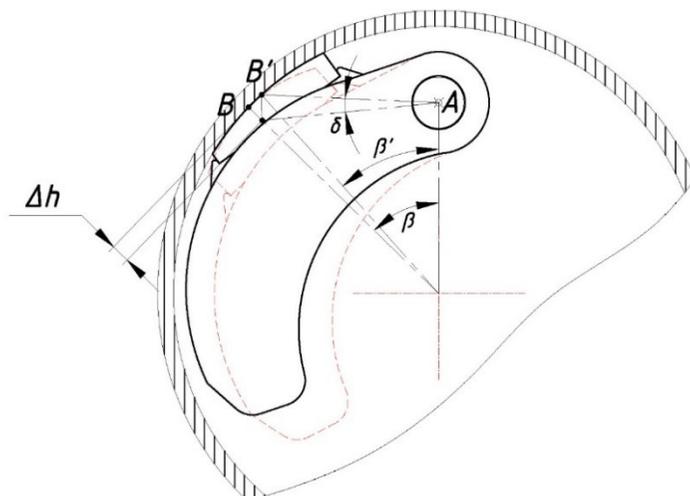


Рис. 3. Схема изменения положения тормозной колодки в процессе износа Δh фрикционной накладки ЦФР

Составлено авторами

В процессе износа фрикционной накладки ЦФР тормозная колодка проходит дополнительный угол δ (по сравнению с начальным положением), в результате которого изменяется положение точки приложения равнодействующей силы N нормального давления (точки B и B' , рис. 3), а угол β установки накладки уменьшается до β' . В результате скорость V движения паллеты по ЦФР возрастает.

Максимальный износ фрикционной накладки ЦФР определяется

одним из трех факторов:

- износом фрикционной накладки ЦФР до предельных значений [9];
- достижением тормозной колодки максимального дополнительного угла поворота δ_{MAX} , при котором происходит касание элементов тормозной колодки и обечайки ЦФР;
- достижением паллетой допустимой скорости $[v]$ движения паллеты, определяемой по методике, описанной в [4].

Максимальный дополнительный угол поворота δ_{MAX} тормозной колодки ЦФР определяется конструктивно и не зависит от износа фрикционной накладки и угла ее установки β . Пример определения δ_{MAX} для конструкции ЦФР показано на рис. 4.

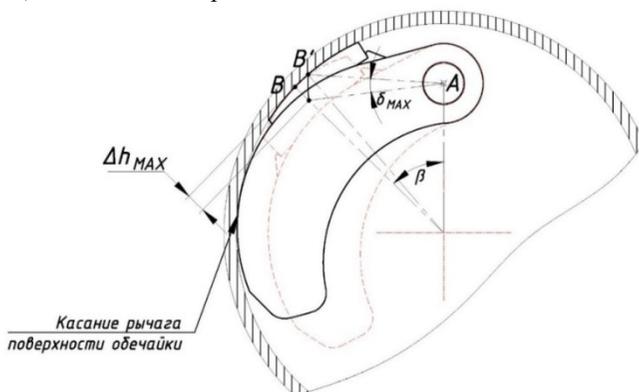


Рис. 4. Схема максимального дополнительного угла δ_{MAX} поворота тормозной колодки ЦФР
 Составлено авторами

В процессе износа фрикционной накладки ЦФР скорость V движения паллеты по ЦФР определяется по уравнению (1) для новых значений параметров:

$$\left\{ \begin{aligned} V(\Delta h) &= \frac{D_{\text{ЦФР}}}{2u} \sqrt{\frac{1}{r'c'm_{\Gamma}} \left[\frac{D_{\text{ЦФР}} \cdot M \cdot g \cdot (\tan \alpha - w)}{i_{\Gamma} \cdot D_{\text{ВН}} \cdot f \cdot (1 + u \cdot \eta_{\text{ЦФР}})} \cdot (a' - f \cdot b') + K' \cdot (k_1' + k_2') \right]}; \\ a' &= l_0 \cdot \sin \beta'; \\ b' &= \frac{D_{\text{ТОРМ}}}{2} - l_0 \cdot \cos \beta', \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где Δh – линейный износ фрикционной накладки ЦФР, м; r' – радиус действия центробежной силы в изношенном состоянии, м; K' – сила упру-

гости размыкающей пружины в процессе износа, H ; a' , b' , c' , k'_1 , k'_2 - плечи действия соответственно сил N нормального давления фрикционной накладки на обечайку ЦФР, трения N_f , центробежной силы $P_{ЦБ}$ и сил размыкающих пружин K' в изношенном состоянии, m ; β' – угол установки фрикционной накладки в изношенном состоянии.

Анализ влияния угла установки фрикционной накладки на ее износ проводился с использованием геометрической модели центробежного тормоза ЦФР, построенной в САПР AutoCAD (США). При этом в геометрической модели определялась площадь изношенной части накладки при допущении, что скорость движения паллеты не превышает допустимых значений. Для дальнейшего расчета массового износа I_M фрикционной накладки ЦФР использовались данные плотности фрикционно-полимерного материала (далее ФПМ) типа ЭМ-1 $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$. Форма и параметры накладки приведены на Рис. 5.

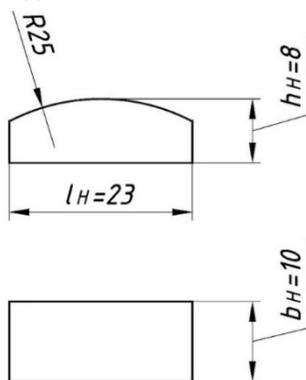


Рис. 5. Фрикционная накладка
Составлено авторами

Результаты

Зависимость массового износа I_M фрикционной накладки ЦФР от угла β ее установки и дополнительного угла поворота δ тормозной колодки в процессе износа приведена на рис. 6. Данные получены для $l_0 = 30$ мм, $l_H = 23$ мм, ширина накладки $b_H = 10$ мм, $D_{ВН} = 83$ мм.

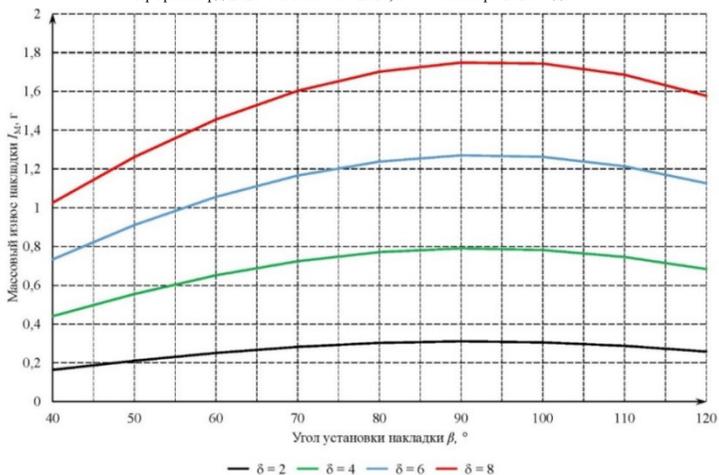


Рис. 6. Зависимость массового износа I_M фрикционной накладки ЦФР, выполненной из ФПМ типа ЭМ-1, от угла β её установки и угла дополнительного поворота δ тормозной колодки
Составлено авторами

Анализ полученных данных показывает, что максимальный массовый износ I_M фрикционной накладки ЦФР достигается при угле её установки $\beta \approx 80-110^\circ$ и составляет $I_M^{MAX} = 1,7 \dots 1,75$ г.

Обсуждение

Согласно результатам [5] наибольшая эффективность работы центробежного тормоза ЦФР достигается при установке накладки в диапазонах $20 \dots 40^\circ$ и $100 \dots 120^\circ$. Таким образом, полученные результаты позволяют уточнить область рациональных значений диапазона углов установки фрикционной накладки ЦФР. Для рассмотренной конструкции рациональный диапазон установки фрикционной накладки, обеспечивающий наибольшую эффективность работы, составляет $\beta \approx 100 \dots 110^\circ$.

При использовании других материалов фрикционной накладки необходимо провести аналогичные исследования по определению рабочего диапазона углов установки, выделения из рабочего диапазона областей наибольшей эффективности работы ЦФР согласно методики, описанной в [5], затем уточнить полученные диапазоны по методике, приведенной в данной работе. При этом необходимо на всех этапах проверять условие не превышения допустимых скоростей движения груза по формуле (1) и

данным работы [4].

Заключение

Зависимость массового износа фрикционной накладки ЦФР от угла ее установки носит нелинейный характер и показывают необходимость учета неравномерности износа фрикционной накладки на ее положение на тормозной колодке.

Результаты работы позволяют использовать представленную методику для оценки применимости выбранного материала, размеров и формы фрикционной накладки, а также дополняют уже существующие знания по разработке эффективной конструкции центробежных тормозов ЦФР, позволяющих увеличить срок их службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boysen, N., Boywitz, D. & Weidinger, F. (2018) Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access, *OR Spectrum*, 40 (4), pp. 1141-1170/
2. Derhami, S., Smith, JS. & Gue, KR. (2017) Optimising space utilisation in block stacking warehouses, *Int J Of Prod Res*, 55 (21), pp. 6436-6452/
3. Ghalekhondabi, I. & Masel, DT. (2018) Storage allocation in a warehouse based on the forklifts fleet availability, *Journal Of Algorithms & Computational Technology*, 12 (2), pp.127-135/
4. Safronov, E. & Nosko, A. (2019) A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack, *Acta Mechanica et Automatica*, 13 (2), pp.80-85.
5. Safronov, E. & Nosko, A. (2020) Influence of the brake lining position on the efficiency of the centrifugal friction roller, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709 (2).
6. Sulirova, I., Zavodska, L., Rakyta, M. & Pelantova, V. (2017) State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing, 12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, *Procedia Engineering*, (192), pp. 857-862.
7. Носко, А.Л. (2017). Оценка эффективности тормозов при обеспечении безопасной работы грузоподъемных машин: Монография. - М.: Университетская книга, 2017. - 135 с.
8. Сафронов, Е.В. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: Монография / Е.В. Сафронов, И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко. - М.: Университетская книга, 2018. - 72 с.
9. Тормозные устройства: Справочник / М.П. Александров, А.Г. Лысяков, В.Н. Федосеев, М.В. Новожилов; Под ред. М.П. Александрова. - М.: Машиностроение, 1985. - 312 с

УДК 539.92

ИСТОРИЯ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ ПО ТРИБОЛОГИИ В РОССИИ

Т.В. Погодина, ст. преподаватель
А.В. Соколов, канд. техн. наук
Т.М. Сибрина

Ярославский государственный технический университет

Рассказывается о науке трибология и награде за достижения в области трибологии. Об истории золотой медали по трибологии и российских ученых, которые были лауреатами золотой медали по трибологии.

***Ключевые слова:** трибология, золотая медаль по трибологии, российские лауреаты.*

THE HISTORY OF THE GOLD MEDAL IN TRIBOLOGY IN RUSSIA

T.V. Pogodina, Senior Lecturer
A.V. Sokolov, Candidate of Technical Sciences
T.M. Sibrina

Yaroslavl State Technical University

It tells about the science of tribology and the award for achievements in the field of tribology. On the history of the gold medal in tribology and the Russian scientists who were the laureates of the gold medal in tribology.

***Keywords:** tribology, tribology gold medal, Russian laureates*

Введение

Термин «трибология» предложен английским ученым Питером Джостом, который употребил его в своем докладе председателя специальной комиссии Министерству образования и науки Великобритании 9 марта 1966 года. В последние годы трибология развивалась как самостоятельная, имеющая фундаментальное и большое практическое значение научная дисциплина.

Трибология изучает внешнее и внутреннее трение твердых и жидких тел, учитывая их износ. Она рассматривает протекание процессов,

связывающих воедино макро- и микропластическую деформации, квазиупругое взаимодействие контактирующих поверхностей, внутреннее и внешнее трение, схватывание за временные промежутокки - значительно меньшие, чем позволяет диффузия, поверхностные волны, возбуждаемые ударными воздействиями, автоколебания и многие другие явления.

О важности проблемы трибологии говорят следующие цифры: потери на трение составляют до 30% потребляемой в мире энергии. Так, по самым последним данным Международного комитета по трибологии, экономия от использования достижений в области трибологии в Китае составляет ежегодно 41,5 миллиарда долларов США.

Материалы и методы

Питер Джост является основателем international tribology council (Международный совет по трибологии). Членами совета являются такие страны как: Австрия, Беларусь, Бельгия, Бразилия, Болгария, Китай, Чехия, Египет, Финляндия, Франция, Грузия, Германия, Венгрия, Индия, Италия, Япония, Корея, Литва, Малайзия, Нигерия и т.д. В общей сложности в совет входят 36 стран. В том числе и Россия. Представителем в Международном совете по трибологии от России является академик РАН, профессор Ирина Георгиевна Горячева.

За достижения в области трибологии вручают золотую медаль Британского Трибологического треста.

Золотая медаль Трибологического треста является самой большой наградой в мире по трибологии. Золотая медаль по трибологии была учреждена и впервые присуждена в 1972 году. Она была присуждена 45 лицам из 15 различных стран (см. таблицу 1). Надо сказать, что медаль эту, по значимости в области трибологии соизмеримую разве что с премией Оскар в мире кино, учредила королева Елизавета II под впечатлением доклада ученых об огромной значимости науки о трении для экономики страны. По их данным разработка новых технологий в этой области могла бы сэкономить Великобритании сумму, эквивалентную полутора процентам валового национального дохода. Для поощрения новых разработок в столь важном направлении и была учреждена эта медаль, ежегодно вручаемая с тех пор наиболее выдающемуся, с точки зрения Международного трибологического общества, ученому-трибологу - теперь уже не только в Великобритании, но и во всем мире.

Таблица 1. Страны, получившие золотую медаль по трибологии

Страна	Количество медалей
Австралия	1
Австрия	1
Великобритания	7
Германия	3
Израиль	2
Италия	1
Китай	2
Нидерланды	1
Польша	1
Россия	6
Румыния	1
США	10
Франция	3
Швеция	1
Япония	5

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что всех больше медалей получила США, а несколько стран получили пока что по одной медали.

Россия за все время получила 6 медалей по трибологии, что составляет 13 % от общего количества медалей. Её получили:

- И.В. Крагельский
- Г.В. Виноградов
- А.В. Чичинадзе
- Н.А. Буше
- Д.Н. Гаркунов
- И.Г. Горячева

Результаты

В 1975 году Игорь Викторович Крагельский получил золотую медаль по трибологии.

Крагельский проводил исследования в сфере сухого трения и износа твердых материалов. Профессор Крагельский был первым ученым в СССР, проводившим фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования в этой области, в которых он является автором шести фундаментальных книг и нескольких сотен научных работ и статей.

Также профессор Крагельский посвятил много усилий исследованию трения и износа в вакууме и опубликовал монографию "трение и износ в вакууме" (машиностроение, Москва, 1973).

В 1982 году Георгий Владимирович Виноградов получил золотую медаль по трибологии.

С 1941г. Г.В. Виноградов служил в Академии бронетанковых войск, где начал заниматься консистентными смазками, главным образом, их рецептурами и реологическими свойствами, а также трением и износом металлов. Конечно же, эти работы носили «военно-прикладной» характер, и именно на их основе в Советской Армии появились новые вязкопластичные твердообразные смазки, прекрасно работающие в танках и самоходных орудиях в климатических условиях России. Наряду с исследованиями прикладного направления, им было продолжено изучение фундаментальных основ реологии смазок. Они нашли свое воплощение в докторской диссертации «Исследование в области реологии консистентных смазок», защищенной в 1951г. уже в ИНХС АН СССР, в докторантуру которого он был прикомандирован в 1948г. В полном объеме научный потенциал Г.В. Виноградова развернулся в 60-е годы, когда он начал заниматься совершенно новой и бурно развивающейся областью исследований – реологией полимеров.

В 1991 году получил золотую медаль по трибологии Чичинадзе Автандил Виссарионович.

Профессор Чичинадзе почти 50 лет изучает фрикционные явления и проблемы, как ученый, так и инженер. Его кандидатские и докторские диссертации по проблемам внешнего трения, в основном применительно к тормозам, сцеплениям и передающим устройствам, получили международное признание.

Его наиболее известная научная работа связана с разработкой теории тепловой динамики и моделированием трения и износа пар трения в условиях сухого трения и граничной смазки.

Он участвовал в разработке, испытаниях и внедрении первого советского производства термостойких фрикционных полимерных материалов, что привело к экономии нескольких миллионов рублей. За эту работу профессор Чичинадзе был удостоен первых премий Академии Наук СССР и Министерства авиационной техники.

Его исследования по замене качения на скольжение при взлете и посадке самолетов привели к созданию надежного и долговечного лыжного и колесного шасси самолета для взлета и посадки на наземном аэродроме. Эта работа получила еще одну награду от Академии Наук СССР и Министерства авиационной техники СССР.

Доктор технических наук, профессор Буше Николай Александрович в 2002 году получил золотую медаль по трибологии.

Одно из первых его предложений (использовать в подшипниках баббит с добавлением кальция) позволило значительно продлить срок службы оси колёсной пары. Она не ломалась даже тогда, когда сильно перегревалась. Когда новшество внедрили, число сходов и аварий на дорогах заметно снизилось. В результате за создание нового антифрикционного сплава и разработку технологии получения баббитов БК2 молодой учёный вместе с коллегами в 1950 году был отмечен Сталинской премией.

В 1959 году Буше предложил руководству Московского института цветных металлов вместо небольшой литейной мастерской создать лабораторию цветных металлов, в которой впоследствии под его руководством были разработаны совершенно новые антифрикционные сплавы на алюминиевой основе для двигателей внутреннего сгорания. Вслед за ними появились литые алюминиево-оловянные сплавы, из которых изготавливали подшипники.

А созданные специалистами института сталеалюминиевые биметаллические подшипники широко применялись на тепловозных дизелях различного типа. Вначале их изготавливали прокатным способом. Позже бывший фронтальной минёр Николай Буше предложил более эффективный способ их производства – с помощью энергии взрыва.

Российский ученый, профессор Дмитрий Гаркунов в 2005 году получил золотую медаль Британского трибологического треста за выдающиеся заслуги в области трибологии.

Церемония награждения прошла в пятницу в посольстве Великобритании в Москве. Медаль ученому вручил посол Великобритании Этони Брентон. Посол поздравил ученого и его учеников, собравшихся на торжественное мероприятие в дипмиссии.

Автор 2-х научных открытий:

- явление «избирательного переноса» (эффект безызносности)
- «водородное изнашивание металлов»

Суть явления безызносности материалов, в том, что силу трения в определенных условиях можно заставить не разрушать поверхности трения, а наоборот, защищать их. Если в смазочный материал ввести ионы меди, или более дорогостоящих благородных металлов, то окислительно-восстановительные реакции на поверхностях трения приведут к тому, что в процессе работы между трущимися деталями образуется тонкая защитная пленка из меди или другого благородного металла. Подобно тому,

как особая жидкость в живых суставах организма на десятки лет предохраняет поверхности костей от трения, этот слой в узлах трения механизмов защищает от износа металлические поверхности.

Что же касается явления водородного износа, то оно скорее противоположно по сути эффекту безызносности. Около 40 лет тому назад выяснилось, что водород в узлах трения очень агрессивен. Образуясь в узлах трения из трущихся материалов или из попавшей в зону контакта воды, атомарный водород образует молекулы, которые буквально распирают узлы трения, приводя к образованию трещин.

Как защитить металл от проникновения водорода? Оказалось, что самой хорошей защитой является как раз эффект безызносности. Дело в том, что водород не способен просочиться через плотную и пластичную медную пленку. Это свойство меди, кстати, широко используют американцы, которые покрывают поверхности деталей тонким слоем золота или меди, если хотят предотвратить проникновение в них водорода.

25 мая 2009 года посол Великобритании в Москве Анна Прингл (Dame Anne Pringle) вручила Золотую медаль по трибологии российскому ученому, действительному члену Российской академии наук Ирине Георгиевне Горячевой.

На специальной церемонии в своей Резиденции Дейм Анн Прингл выступила с речью о достижениях академика Горячевой в контактной механике и ее приложении к трибологии.

И.Г. Горячева работает в области деформируемого твёрдого тела, занимаясь в основном задачами механики контактных взаимодействий и трибологии. Ею внесён существенный вклад в разработку теоретических основ механики дискретного контакта и методов расчёта контактных характеристик однородных и неоднородных шероховатых тел, в развитие теории взаимодействия упругих и вязкоупругих тел с учётом адгезионных сил различной природы, в построение аналитических методов решения ряда смешанных задач теории упругости и вязкоупругости.

Обсуждение

В настоящее время трибология признана всеми. Как отдельный предмет она преподаётся во многих высших и средних учебных заведениях и на курсах повышения квалификации в развитых странах.

Созданы специализированные исследовательские центры, во многих институтах трибология является одним из важнейших направлений исследований.

Заключение

На базе нашего вуза, начиная с 2019года,каждые 2 года проводится симпозиум по трибологии.

Цели симпозиума:

- совершенствование подготовки специалистов в области трибологии для отечественных науки и промышленности,
- содействие научно-исследовательским работам по снижению затрат на трение и износ,
- просветительская работа по организации Симпозиумов и изданию Сборника его трудов с международным рейтингом цитирования,
- повышение уровня публикаций по трибологии в научных и образовательных рейтинговых системах.

Симпозиум будет проходить при поддержке:

- Союза Научных и Инженерных Обществ РАН РФ;
- Международного Совета по Трибологии (Великобритания);
- Межведомственного Научного Совета по Трибологии ИПМех РАН;
- Министерства науки и образования Российской Федерации;
- Национальной Академии Наук Беларуси;
- Ассоциации Инженеров - трибологов при РосСНИО;
- Института Прецизионной Механики (Польша);
- Правительства Ярославской области;
- Европейской Ассоциации Производителей Фрикционных Материалов (Германия);
- ИМАШ РАН РФ, ИПМех РАН РФ;
- МГУ им. Ломоносова, МВТУ им. Баумана;
- ВНИИЖТ, МИИТ, НАМИ, МАМИ, МАДИ;
- АвтоВАЗ, ГАЗ, МТЗ, других производителей автомобильной и тракторной техники, а также отраслей антифрикционных и фрикционных материалов;
- Ведущих организаций в области проблем трения и износа в России и за рубежом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Николай Александрович [Электронный ресурс] // ИММС НАН Беларуси. URL: <https://www.mpri.org.by/nauka/pochetnye-doktora/bushe-nikolaj-aleksandrovich.html>
2. Виноградов Георгий Владимирович [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Виноградов,_Георгий_Владимирович
3. Гаркунов Дмитрий Николаевич [Электронный ресурс] // Электронная энциклопедия ТГУ. URL: http://wiki.tsu.ru/wiki/index.php/Гаркунов,_Дмитрий_Николаевич
4. Джост Питер [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Джост,_Питер
5. Кафедра «Детали машин» История кафедры [Электронный ресурс] // Московский политех. URL: <https://old.mospolytech.ru/?id=1749>
6. Посол Великобритании вручила золотую медаль в области трибологии российскому ученому, академику РАН Ирине Георгиевне Горячевой [Электронный ресурс] // Российская Академия Наук. URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=66a3c1f4-9058-48d9-b8d6-5d8ceaaa7b7e>
7. Школа профессора Крагельского И.В. [Электронный ресурс] // ИМАШ РАН. URL: <http://www.imash.ru/about/schools/school-kragelskiy/>