

УДК 62.620

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩЕЙ ПРИСАДКИ ВАЛЕНА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛА ТРЕНИЯ СТАЛЬ 45 — БрО5Ц5С5

М. КАНДЕВА^а, Д. КАРАСТОЯНОВ^б, Е. АСЕНОВА^в, К. ЯКИМОВСКА^{б,г}, С. СИМЕОНОВ^а, А. ВЕНЦЛ^{б,е+}

В статье рассматривается изменение коэффициента трения и распределение температуры в зоне контакта для пары трения сталь 45 — БрО5Ц5С5. Исследования проводили по схеме “вал—втулка” для трёх значений нагрузки в режиме граничного трения с трансмиссионным маслом SAE 80W с присадкой Валена и без неё. Установлено, что наличие присадки в масле снижает коэффициент трения на 11—21%, в зависимости от приложенной нагрузки. При этом, максимальное снижение коэффициента трения наблюдается при наибольшей приложенной нагрузке в 1500 Н.

Ключевые слова: коэффициент трения, температура в зоне контакта, смазка, присадка Валена.

Введение. Разработка новых смазок и присадок очень перспективна для снижения трения и износа при граничной смазке. Ремонтно-восстанавливающие присадки играют в этом большую роль и при определённых режимах смазывания, частично восстанавливают изношенные поверхности и снижают коэффициент трения в трибосистеме. Среди них известны металлосодержащие добавки, растворимые в маслах [1—4]. Их влияние на трение связано с самоорганизацией и с избирательным переносом при трении [1, 7—10]. Металлоплакирующая присадка Валена — это металлосодержащий, растворимый в масле материал, запатентованный Корником и др. [2]. Эта присадка способна улучшать триботехнические, противоизносные и противозадирные свойства трибопары, благодаря образованию тонкой плёнки (1—4 мкм) на поверхностях трения в зоне контакта.

Цель работы — исследовать влияние металлоплакирующей присадки Валена на изменение коэффициента трения и температуры в зоне контакта для пары трения сталь 45 — БрО5Ц5С5, работающей в режиме граничного трения по схеме “вал—втулка”.

Материалы и методы исследований. Измерения коэффициента трения проводили по схеме “вал—втулка” (узел подшипника скольжения) на установке “DM 29M”, представленной на рис. 1.

Размеры и материалы исследуемого узла подшипника скольжения приведены в табл. 1.

Смазочная смесь с присадкой Валена готовилась по специальной методике.

Измерения коэффициента трения на установке “DM 29M” (рис. 1) проводили по следующей методике:

а Faculty of Industrial Technology, Technical University of Sofia. Bulgaria, 1000, Sofia, Kliment Ohridski Blvd, 8.

б Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences. Bulgaria, 1113, Sofia, Acad. G. Bonchev str., Block 2.

в Society of Bulgarian Tribologists, Tribology Centre, Technical University of Sofia. Bulgaria, 1000, Sofia, Kliment Ohridski Blvd, 8.

г Ss. Cyril and Methodius University — Faculty of Mechanical Engineering in Skopje. Republic of Macedonia, P.O. Box 464, 1000, Skopje, Karposh II bb

д Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology. Czech Republic, 616 69, Brno, Technická, 2896/2

е University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering. Serbia, 11120, Belgrade 35, Kraljice Marije, 16.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: avencl@mas.bg.ac.rs.

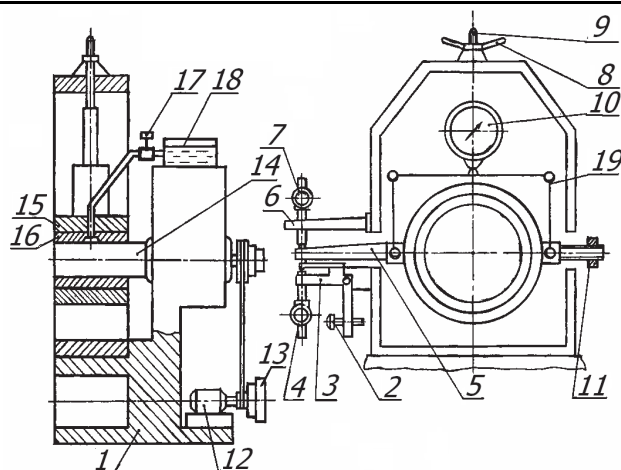


Рис. 1. Схематическое изображение используемой испытательной установки “DM 29M”: 1 — корпус; 2 — регулирующий винт; 3 — подвижная балка; 4 и 7 — тензометры; 5 — тензометрическое коромысло; 6 — неподвижная балка; 8 — ручка; 9 — нагружающий винт; 10 — динамометр; 11 — противовес; 12 — двигатель постоянного тока; 13 — трёхступенчатая клиновидная ремённая передача; 14 — вал; 15 — дюралюминиевая станина; 16 — подшипник скольжения (втулка); 17 — регулирующий вентиль; 18 — резервуар со смазкой; 19 — нагружающая рамка

Таблица 1. Характеристики узла подшипника скольжения

Диаметр вала	$d = 60$ мм
Длина втулки	$l = 60$ мм
Диаметральный зазор	$C = 0,06$ мм
Материал вала	Конструкционная углеродистая сталь 45 (ГОСТ 8731–87); HRC = 35
Материал втулки	Свинцовистая бронза БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613–79); 60 НВ
Смазочный материал	Трансмиссионное масло SAE 80W, с присадкой Валена (8 об.%) и без неё

– Установка необходимой постоянной частоты вращения $n = 1350$ мин⁻¹ с помощью регулирования трёхступенчатой клиновидной ремённой передачи (13);

– Запуск системы смазывания при помощи регулирующего вентиля (17), обеспечивающего капельную подачу смазки, 30–40 капель в минуту трансмиссионного масла SAE 80W с присадкой Валена и без;

– Установка нормальной нагрузки $P = 500$ Н с помощью нагружающего винта (9) и снятие показаний с динамометра (10) рис. 1; затем эксперимент повторяется с нагрузкой 1250 Н и 1500 Н без остановки работы системы;

– Сброс до нуля двух тензометров (4) и (7);

– Включение двигателя постоянного тока; Считывание значений δ на нижнем тензометре (4) каждые 20 с т. е. после 20, 40, 60, 80, 100 и 120 секунд; значение на верхнем тензометре должно равняться нулю;

– Расчёт коэффициента трения μ на каждом временном интервале для данной нагрузки P , по формуле:

$$\mu = k \frac{\delta}{P}, \quad (1)$$

где $k = 0,23$ — постоянная величина для данной установки; δ — значение силы трения, полученные на нижнем тензометре (4) рис. 1 и P — заданная нормальная нагрузка.

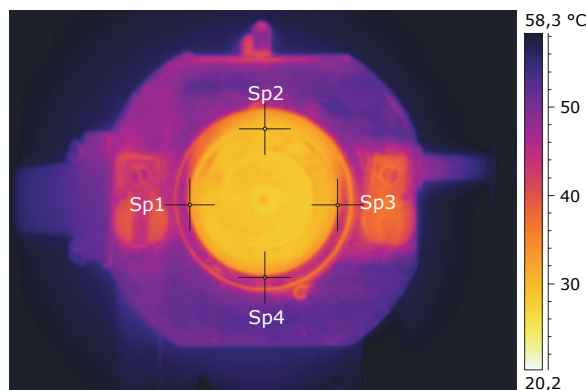
Для каждого испытания, после 120 с работы, термограммы снимали с помощью тепловизора FLIR P640 в четырёх точках (Sp1, Sp2, Sp3 and Sp4), расположенных под углом 90° друг к другу в зоне контакта системы “вал—втулка”, согласно схемы на рис. 2. Температура окружающей среды и относительная влажность так же измерялись в этих точках. Технические характеристики тепловизора FLIR P640: ИК-разрешение 640 × 480 пикс.; теплочувствительность 30 мК при 30 °С; диа-

пазон температур от -40 до 500 °C; зона обзора $12 \times 9^\circ$; минимальное расстояние фокусировки $1,2$ м; разрешающая способность $0,33$ мрад. Измерения проводили на расстоянии 1 м от оборудования; коэффициент излучения $\epsilon = 0,55$.

Результаты исследований и их обсуждение. В табл. 2 представлены сводные значения коэффициента трения при нормальных нагрузках 500 , 1250 и 1500 Н, соответственно. Значения рассчитаны для каждого интервала в 20 с, на протяжении всего времени испытания 120 с. На рис. 2 представлена термограмма в зоне контакта для каждой нагрузки при наличии масла SAE 80W.

Таблица 2. Значения коэффициента трения при различных нагрузках

t, c	20			40			60			80			100			120		
N, H	500	1250	1500	500	1250	1500	500	1250	1500	500	1250	1500	500	1250	1500	500	1250	1500
Трансмиссионное масло																		
f	0,100	0,036	0,026	0,090	0,027	0,020	0,070	0,025	0,020	0,070	0,024	0,019	0,060	0,023	0,019	0,055	0,022	0,019
Трансмиссионное масло с присадкой Валена																		
f	0,059	0,023	0,015	0,057	0,023	0,015	0,056	0,022	0,015	0,052	0,022	0,015	0,050	0,021	0,015	0,049	0,019	0,015



Температура окружающей среды	21,8 °C
Относительная влажность окружающей среды	43,0%
Sp1 температура	58,4 °C
Sp2 температура	60,4 °C
Sp3 температура	59,5 °C
Sp4 температура	67,4 °C
Средняя температура в контакте	61,4 °C

Рис. 2. Термографическая картина, условия окружающей среды и температура в контакте для трансмиссионного масла без присадки Валена при $P = 500$ Н

Из табл. 2 видно, что наличие присадки Валена в масле SAE 80W снизило значение коэффициента трения при всех приложенных нагрузках. К тому же, её наличие влияет на характер изменения коэффициента трения во времени, т. е. устойчивое состояние достигается практически с самого начала испытания, что не наблюдается в отсутствие присадки Валена в трансмиссионном масле. Тем не менее, конечное значение коэффициента трения (после 120 с) использовалось для сравнения (рис. 3), поскольку температура контакта так же измерялась в конце испытания (после 120 с).

Эксперименты показали, что температура контакта неравномерно распределена по четырём точкам (Sp1, Sp2, Sp3 and Sp4) для всех приложенных нагрузок. Для каждой нагрузки самое большое значение получено в точке Sp4, так как эта точка самая нагруженная. В большинстве случаев наличие присадки Валена в трансмиссионном масле снижает температуру в зоне контакта.

На рис. 3 и 4 показаны сравнительные диаграммы коэффициентов трения и средняя контактная температура в конце каждого эксперимента (различная приложенная нагрузка) в случае наличия или отсутствия присадки Валена. Средняя контактная температура используется для сравне-

ния, в то время как коэффициент трения так же имеет среднее значение для всей системы “вал—втулка”.

Стационарный коэффициент трения равен 0,015—0,055, что свидетельствует о том, что скольжение происходило в граничном полужидкостном режиме смазывания, в то время как примерное значение коэффициента трения граничного смазывания от 0,05 до 0,15 [11]. Трибологические характеристики при смешанном смазывании зависят от гидродинамического эффекта, от свойств поверхностных слоёв контактирующих тел и от состава смазки. Это усложняет описания процесса смешанного смазывания; прогнозирование процесса контактного функционирования в смешанном режиме смазывания обычно получают с помощью численного моделирования [12].

Как уже отмечалось, присутствие присадки Валена в трансмиссионном масле снижает коэффициент трения при всех приложенных нагрузках (рис. 3). Снижение было в среднем на 11, 14 и 21% для нормальных нагрузок 500, 1250 и 1500 Н, соответственно. Наибольшее снижение коэффициента трения получено при нагрузке 1500 Н и температуре контакта 71 °С (рис. 4). Это может быть связано с активированием трибохимических процессов присадок, содержащих медь, и контактирующих поверхностей, приводящих к образованию защитного медного слоя на поверхностях вала и втулки после избирательного переноса материала. Это также приводит к возрастанию фактической площади контакта и снижению тангенциальной составляющей контактного взаимодействия.

Снижение коэффициента трения с повышением приложенной нагрузки происходит в обоих случаях, т. е. независимо от наличия присадки Валена (рис. 3). Это означает, что гидродинамический эффект более ярко выражен при высоких нагрузках, т.е. жидкостная смазка наблюдается в большей мере, в соответствии с кривой Штрибека [12].

Таким образом, в трибологическом контакте, большая часть энергии теряется из-за того, что работа трения высвобождается в виде тепла. По этой причине контактные пары с наименьшим коэффициентом трения (рис. 3) должны иметь наименьшую температуру контакта в конце испытания (рис. 4), и наоборот. Причина, по которой этого не происходит в данном случае, в том, что после нагрузки в 500 Н эксперимент повторяется для нагрузок в 1250 и 1500 Н без остановки работы системы и система не охлаждалась до температуры окружающей среды.

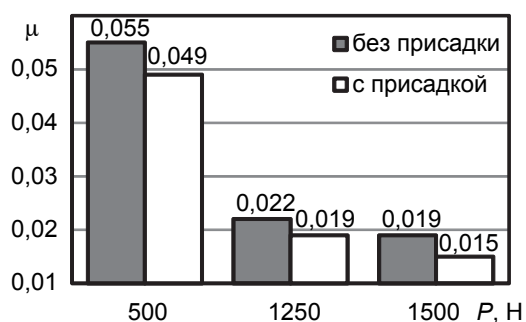


Рис. 3. Установившийся коэффициент трения (после 120 с) для трансмиссионного масла в присутствии и отсутствии присадки Валена при приложенных нагрузках

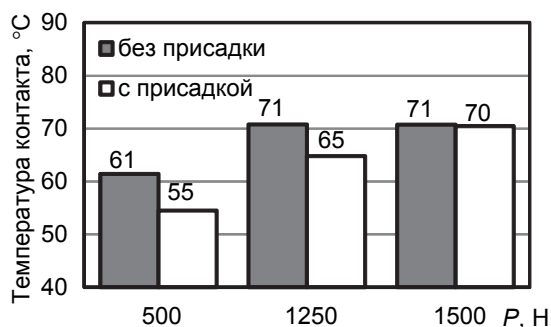


Рис. 4. Средняя температура контакта (после 120 с) для трансмиссионного масла в присутствии и отсутствии присадки Валена при приложенных нагрузках

Средняя температура контакта возрастает с увеличением приложенной нагрузки и стабилизируется при температуре около 70 °С (рис. 4). Повышение температуры происходило медленнее в присутствии присадки Валена в трансмиссионном масле. К тому же, средняя температура контакта была ниже при наличии присадки для всех приложенных нагрузок, таким образом, меньший коэффициент трения даёт меньшую температуру в контакте. Только измеренная в точке Sp4 температура контакта (самая нагруженная точка среди всех) была выше с присадкой Валена (рис. 2), и

это происходило только в случае смешанного смазывания (нагрузки 1250 и 1500 Н). При граничном смазывании (нагрузка 500 Н), присадка Валена эффективна и снижает температуру контакта в точке Sp4.

Заключение. В статье представлено сравнительное исследование изменения коэффициента трения и распределения температуры в зоне контакта трибологической системы “вал—штулка” при капельном смазывании трансмиссионным маслом SAE 80W с использованием присадки Валена и без неё. Результаты эксперимента показали, что:

– Значения стационарного коэффициента трения дают основание полагать, что скольжение осуществляется в основном в режиме смешанной смазки. Граничная смазка имеет место только при низких приложенных нагрузках. Уменьшение коэффициента трения с увеличением приложенной нагрузки происходит в обоих случаях, т. е. независимо от наличия присадки Валена. Самый низкий коэффициент трения получен при самой высокой нормальной нагрузке.

– Присутствие присадки Валена в трансмиссионном масле снижает коэффициент трения при приложенных нагрузках, и влияет на характер изменения коэффициента трения во времени, т. е. устойчивое состояние достигается практически с начала испытания. Коэффициент трения снижается на 11—21%, в зависимости от приложенной нормально нагрузки, и наибольшее снижение наблюдается при наибольшей приложенной нагрузке.

– Температура контакта имеет разные значения в разных точках контактной зоны системы “вал—штулка” для всех приложенных нагрузках. Для каждой нагрузки наибольшее значение измерилось в наиболее нагруженной точке. Средняя температура контакта возрастает с повышением приложенной нагрузки и проявляет тенденцию к стабилизации в обоих случаях, независимо от наличия присадки Валена. Наличие присадки в трансмиссионном масле снижает среднюю температуру в контакте для всех нагрузок.

Исследование выполнено в рамках следующих проектов: (а) Program for scientific-technological collaboration in the tribology study of the metal-plating additive Valena of the Tribology Centre in TU-Sofia and the company Rudservice from Gezkazgan, Kazakhstan; (б) International Faculty Agreement of Cooperation between the Faculty of Mechanical Engineering at the University of Belgrade and the Faculty of Industrial Technology at the Technical University of Sofia; (в) FP7-REGPOT проект № 316087: Aco-mIn (Advanced Computing for Innovation), funded by the FP7 Capacity Programme (Research Potential for Convergence Regions); (г) СЕЕPUS III Network СIII-BG-0703; (д) Проект TR 34028 and TR 35021, поддерживаются Министерством образования, науки и технологического развития Республики Сербия; (е) ДУНК-01/3 funded by the Bulgarian Ministry of Education and Science.

Литература

1. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МСХА. — 2001
2. **Металлсодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов:** Пат. РФ № 2277579 / В. Г. Бабель, Д. Н. Гаркунов, С. М. Мамыкин, П. И. Корник
3. **Kandeva M., Vencel A., and Assenova E.** Influence of “Valena” Metal-Plating Additive on the Friction Properties of Ball Bearings // Tribological Journal BULTRIB 4. — 2014, 18—24
4. **Mamykin S. M., Lapteva V. G., and Kuksenova L. I.** Investigation into the Tribotechnical Efficiency of the Valena Metal-Plating Additive to Lubricating Materials // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2007 (36), no. 2, 153—159
5. **Nicolis G. and Prigogine I.** Self-Organization in Nonequilibrium Systems. — New York: John Wiley & Sons. — 1977
6. **Haken H.** Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology. — New York: Springer-Verlag. — 1983

7. **Литвинов В. Н., Михин Н. М., Мышкин Н. К.** Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. — М.: Наука. — 1979
8. **Shpenkov G. P.** Friction Surface Phenomena. — Amsterdam: Elsevier. — 1995
9. **Kandeva M., Ivanova B., Assenova E., and Vencl A.** Influence of Additives and Selective Transfer on Wear Reduction in the Lubricated Contact // Proc. of the Int. Conf. on Materials, Tribology, Recycling — MATRIB 2014, Vela Luka, Croatia, 26—28.06.2014, — 2014, 197—206
10. **Padgurskas J., Snitka V., Jankauskas V., and Andriušis A.** Selective Transfer Phenomenon in Lubricated Sliding Surfaces with Copper and Its Alloy Coatings Made by Electro-Pulse Spraying // Wear. — 2006 (**260**), no. 6, 652—661
11. **Hamrock B. J., Schmid S. R., and Jacobson B. O.** Fundamentals of Fluid Film Lubrication. — New York: Marcel Dekker. — 2004
12. **Dobrica M. B. and Fillon M.** Mixed Lubrication / in: Wang Q. J., Chung Y.-W. (Eds.), Encyclopedia of Tribology. — New York: Springer. — 2013, 2284—2291

Поступила в редакцию 15.11.15.

Gvozd Engines.

The.

Keywords: dding.