

УДК 621.2.082.18

*М. А. Шилов<sup>1,2</sup>, Л. Б. Маслов<sup>1,2</sup>, П. В. Королёв<sup>1,2</sup>*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИНАХ В КАЧЕСТВЕ ПРОТЕКТОРОВ**

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина,  
ул. Рабфаковская, д. 34, 153003 Иваново, Россия.

<sup>2</sup>Вятский государственный университет, ул. Московская, д. 36, 610000 Киров, Россия.  
E-mail: Mshilov@yandex.ru

*В работе представлены результаты исследования влияния введения углеродных нанотрубок (потенциально мезогенных в лиотропных системах) в структуру эластомерного материала на его износ. Полученные авторами данные по величинам износа для стандартных образцов и образцов, наполненных наночастицами, были сопоставлены с ранее опубликованными результатами исследований других авторов. Это позволило сделать предварительные выводы о влиянии изменения структуры эластомерного материала на его износ. Авторами поставлены задачи дальнейших исследований износа покрытий как с помощью трибологического стенда, так и моделирования процесса численными методами в программном комплексе Abaqus.*

**Ключевые слова:** износ, трение, эластомеры, пневматические шины, углеродные нанотрубки.

**DOI:** 10.18083/LCAppl.2018.1.73

*М. А. Shilov<sup>1,2</sup>, L. B. Maslov<sup>1,2</sup>, P. V. Korolev<sup>1,2</sup>*

**STUDY OF WEAR RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED ELASTOMERS USED AS PROTECTORS IN PNEUMATIC TYRES**

<sup>1</sup>Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin,  
34 Rabfakovskaya St., Ivanovo, 153003, Russia

<sup>2</sup>Vyatka State University, 36 Moscow St., Kirov, 610000, Russia  
E-mail: Mshilov@yandex.ru

*The work presents results of the research on the influence of carbon nanotubes, which are known to be potentially mesogenic in lyotropic systems, introduced into elastomer material on the wear of this material. The wear rates data obtained for standard samples and for the samples filled with nanoparticles have been compared with the published earlier data of other authors. The preliminary conclusions on the influence of variation of elastomeric material structure on its wear were made. The authors aim further research of coatings wear with the help of a tribological test stand as well as the modelling process by numerical methods using Abaqus software package.*

**Key words:** wear, friction, elastomers, pneumatic tires, carbon nanotubes.

## Введение

В настоящее время в современном производстве наметилась тенденция к производству дорогих высокоскоростных легковых пневматических шин. Это, в свою очередь, повлекло повышение требований к качеству и выходным характеристикам шин. В связи со сказанным выше основными задачами в области повышения качества современных шин является увеличение износостойкости протектора, прочности каркаса и прочности связи между элементами шины [1, 2, 3]. Синтетические каучуки вследствие малой стабильности при переработке и эксплуатации под воздействием различных факторов теряют ценные физико-механические свойства [3, 4], что обуславливает необходимость их стабилизации. В качестве стабилизаторов, как показано в работе [5], использованы каламитные потенциально мезогенные соединения. Однако стабилизировать эластомер возможно еще и углеродными нанотрубками (УНТ) [6–10]. Доказательством являются результаты исследовательской группы [11]. В обзорной статье [1] А. С. Сонин с соавторами показывает, что УНТ являются перспективными материалами, так как обладают анизотропными свойствами, присущими минеральным жидким кристаллам. Строение УНТ позволяет их использовать, как говорилось ранее, в качестве стабилизатора в протекторной резине. Это связано с тем, что УНТ на концах ориентируются гораздо лучше, чем в центре, что приводит к сильному взаимодействию с поверхностью, т. е. с молекулами протекторной резины. Снижение энергетических потерь автомобиля на износ протектора при качении является одной из важных задач. Поэтому целью работы стало исследование влияния модифицированных на наноуровне эластомеров, используемых при изготовлении протекторной резины [12], на уровень износа.

## Эксперимент

Для исследования износа использовались образцы как из наноструктурированного эластомерного материала в форме цилиндров с диаметром  $d = 18$  мм и длиной  $l = 25$  мм, так и из стандартного *бутадиен-нитрильного* каучука (рис. 1). Физико-механические свойства последнего известны [7, 11]. Разработка состава

принадлежит коллективу авторов из Вятского государственного университета [12].

Испытания на износ проводились на универсальной машине трения УМТ-2168 «Унитриб», разработанной учеными ИМАШ РАН и Точприбор (Иваново) как при сухом граничном трении, так и в присутствии воды при возвратно-поступательном движении (рис. 2). Выбор схемы трения обусловлен наибольшим износом при скольжении [13].



Рис. 1. Образец наноструктурированного эластомерного материала

Fig. 1. A sample of a nanostructured elastomeric material

В корпусе 5 испытательной установки в подшипниках размещен полый вал 3, внутри которого проходит шток 4. Диск 8 установлен на штоке 4 шарнирно и через кольцо 6 и гибкую связь 9 связан с валом 3, который через рычаг 10 воздействует на упругий элемент 11 силоизмерителя. От мембранного пневмопривода 1 осевая нагрузка передается штоку 4 и диску 8. На диске 8 устанавливаются пальчиковые образцы 7 или закрепляются специальные камеры с приспособлениями для испытания пар трения. При этом диск 8 может жестко соединяться с кольцом 6. Для охлаждения водой в диске 8 имеются внутренние каналы. Подвод образцов осуществляется перемещением корпуса 5 по станине 18 путем вращения рукоятки 19.

С помощью специальных приспособлений реализуются различные схемы испытаний. Съемные камеры позволяют проводить испытания образцов типа «вал – втулка» или «вал – палец» как при вращательном, так и при качательном движении вала. В этих случаях привод осуществляется от кривошипа 16, установленного на валу 17 редуктора 13. Во всех случаях нагрузка на образцы создается автономным мембранным пневмоприводом 1.

Для измерения суммарного числа оборотов диска 14 (путь трения) служит датчик 20. Переключение скоростных диапазонов вращения электродвигателя 2 реализуется с помощью датчика 21. Частоту вращения вала 12 редуктора блока привода машины трения можно плавно

изменять в диапазоне от 50 до 3000 об/мин, а величину нормальной нагрузки на образцы можно регулировать в интервале от 0,02 до 5 кН путем изменения давления сжатого воздуха, подаваемого в пневмопривод 1.

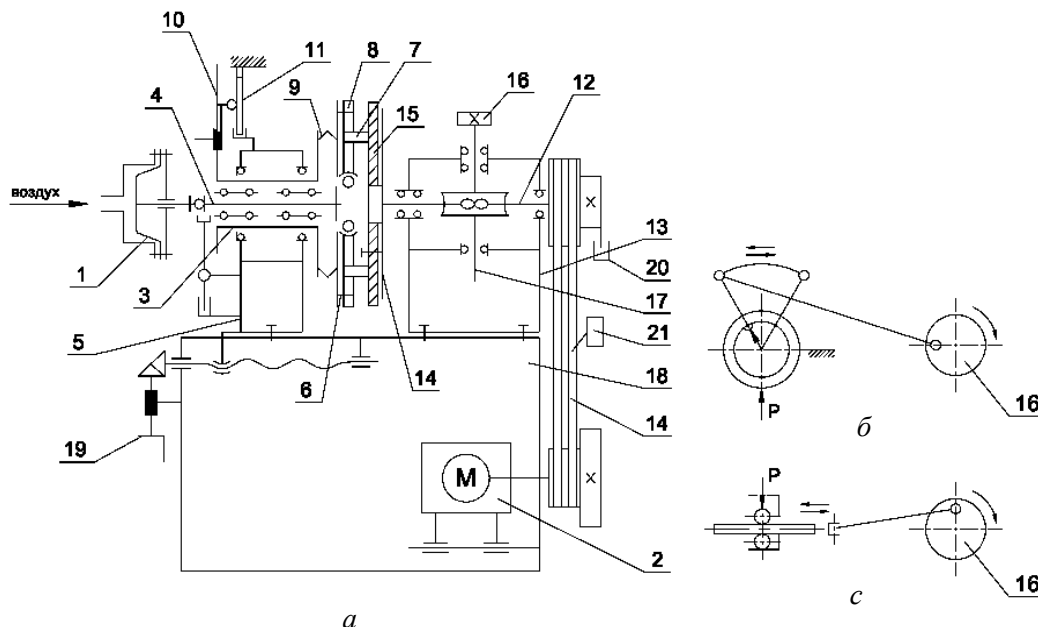


Рис. 2. Принципиальная схема универсальной машины трения УМТ-2168 «Унитриб»: а – общая схема; б – схема испытаний при качательном движении; с – схема испытаний при прямолинейном возвратно-поступательном движении

Fig. 2. Schematic diagram of UMT-2168 «Unitrib» tribometer: а – general diagram, б – test circuit at oscillatory motion, с – test circuit at to-and-fro motion

Температуру в зоне трения регистрировали с помощью тепловизора марки Fluke Ti400. Измерения проводились в диапазоне от 15–45 °С.

При подготовке к испытаниям на каждом этапе проводились подготовительные работы, включающие в себя:

- 1) обезжиривание элементов пар трения;
- 2) истирание образцов до получения стационарного режима трения;
- 3) измерение линейных размеров и взвешивание образца до и после истирания.

При нахождении в стационарном режиме проводились измерения момента трения  $M_{тр}$ , Н·м, нормальной нагрузки  $N$ , Н и соответствующего пути трения  $L$ , км. Каждый из образцов истирали в среднем по 6 часов. Путь трения составлял 25 км. Погрешности измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Погрешности измерений

Table 1. Measurement errors

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность
Путь трения, км	24–25	± 0,01
Время испытания, мин	540–600	± 1
Нагрузка, Н	200	± 1
Скорость качения, м/с	10–15	± 0,1
Скорость скольжения, м/с	1	± 0,01

Давление в контакте подбиралось исходя из реальных условий контакта колеса и поверхности качения и составляло до 6 МПа.

### Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что введение УНТ в резиновую смесь приводит к снижению не только коэффициента трения, но и снижает массовый износ почти в 3 раза по сравнению со стандартными образцами (табл. 2, 3). Это связано, по-видимому, с положительным

влиянием пластификатора, который при сухом трении играет роль граничной смазки. При испытании образцов на трение в водной среде наблюдается снижение величины коэффициента трения и износа всех образцов. Наиболее стабильные показания коэффициента трения демонстрирует образец с УНТ.

Таблица 2. Изменения коэффициента трения и износа образцов резин на основе бутадиен-нитрильного каучука

Table 2. Changes of friction coefficient and wear of rubber samples on the base of butadiene-nitrile rubber

№ п/п	Название образца	Коэффициент трения за время испытаний, мин					Износ за 300 мин., $\Delta m \cdot 10^{-3}$ кг
		0	60	120	200	300	
1.	Бутадиен-нитрильный	2,23	2,32	2,33	2,31	2,34	1,5
2.	Бутадиен-нитрильный с УНТ	1,96	1,78	1,83	1,82	1,56	0,4
3.	Из шины Michelin	2,15	2,2	2,2	2,3	2,32	0,9
4.	Из шины Hankook	2,16	2,21	2,23	2,2	2,31	0,9

Таблица 3. Изменения коэффициента трения и износа образцов резин на основе бутадиен-нитрильного каучука при трении в воде

Table 3. Changes of friction coefficient and wear of rubber samples on the base of butadiene-nitrile rubber at friction in water

№ п/п	Название образца	Коэффициент трения за время испытаний, мин					Износ за 300 мин., $\Delta m \cdot 10^{-3}$ , кг
		0	60	120	200	300	
1.	Бутадиен-нитрильный	1,2	1,25	2,33	2,31	2,34	1,3
2.	Бутадиен-нитрильный с УНТ	0,9	0,85	0,85	0,85	0,82	0,1
3.	Из шины Michelin	1,1	1,23	1,25	1,3	1,3	0,7
4.	Из шины Hankook	1,1	1,19	1,26	1,3	1,3	0,7

Вследствие того, что возрастает энергия когезии, на графике зависимости износа от давления (рис. 3) наблюдается резкое увеличение интенсивности изнашивания при увеличении нагрузки. Наименьший износ наблюдается у образца 2.

Здесь зависимость износа практически пропорциональная. Следует отметить, что для

получения наиболее объективной картины протекания реальных физико-механических процессов необходимо анализировать продукты износа. Собрать их – сложный и трудоемкий процесс. Для решения этой проблемы нами использовано смазочное действие жидкости, исключаяющее «засаливание» абразивной поверхности истирающего элемента.

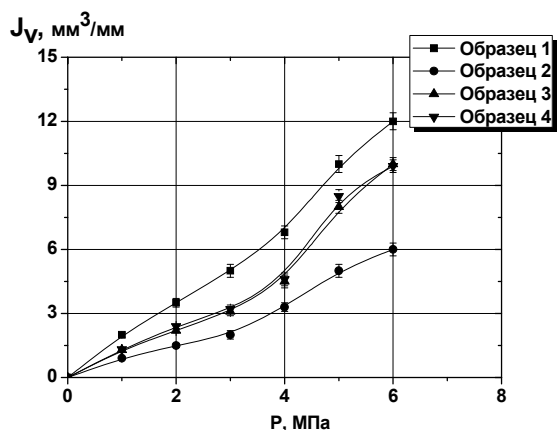


Рис. 3. Зависимость износа от состава резины и давления  
Fig. 3. Dependence of wear on rubber composition and pressure

Анализ поверхности трения резины показывает наличие рисунка Шалламаха (рис. 4), что свидетельствует о развитии интенсивного механизма изнашивания посредством «скатывания».

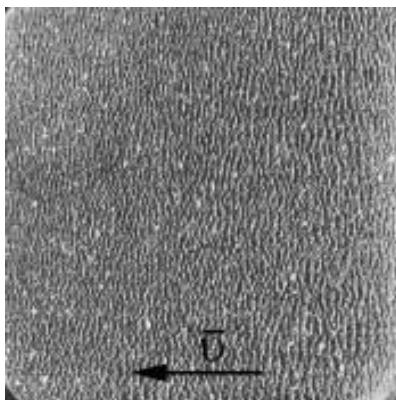


Рис. 4. Морфология поверхности трения резины  
Fig. 4. Morphology of friction surface of rubbers

Продукты изнашивания имели вид липкого субстрата, покрытого густой маслянистой жидкостью темного цвета. Эти признаки указывают на интенсивную механохимическую деструкцию, развивающуюся в поверхностных слоях эластомера. Поскольку исследования проводились при стабильной температуре воды – 19 °С, термическая деструкция исключалась. Вследствие механохимической деструкции поверхность трения размягчалась и эластомер

терял свои упругие свойства. Отсюда и резкое возрастание износа образцов при увеличении нагрузки из-за нарушения условий смазки.

### Выводы

Таким образом, в условиях абразивного изнашивания и смазки водой установлено влияние типа каучука и его структурной устойчивости на абразивную износостойкость эластомеров. Однако решающее влияние на износ исследуемых эластомеров играют УНТ. Установлена связь износа с физико-механическими свойствами резины для низкоскоростного нагружения, а также связь величины износа с энергией когезии и усталостной выносливостью образцов.

Для проверки эффективности эластомерной композиции была изготовлена опытная партия пневматических шин. Для их исследования планируется использование стенда LAT-100.

### Список литературы / References

1. Mark D. Frogley, Ravich D., Wagner D.H. Mechanical properties of carbon nanoparticle-reinforced elastomers. *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 1647–1654.
2. Morozov I., Lauke B., Heinrich G. A new structural model of carbon black framework in rubbers. *Computational material science*, 2010, **47** (3), 817–825.
3. Никулин С.С., Пугачева И.Н., Черных О.Н. Композиционные материалы на основе бутадиен-стирольных каучуков. М.: Академия Естествознания, 2008. 145 с. [Nikulina S.S., Pugacheva I.N., Chernikh O.N. Composite materials based on styrene-butadiene rubber. Moscow: Publisher «Akademiya Estestvoznaniya», 2008, 145 p. (in Russ.)].
4. Ntziachristos L., Boulter P. Road vehicle tyre and brake wear. Road surface wear // *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*. Copenhagen, European Environment Agency, 2009, Part B, 32 p.
5. Фокин Д.С. Физико-химические свойства и применение мезогенных производных фенилбензоата, азо- и азоксибензолов с полярными терминальными заместителями: дис. ... канд. хим. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-техн. ун-т, 2011. 142 с. [Fokin D.S. Physical and chemical properties and application of mesogene derivatives of the phenylbenzoate, azo- and azoxybenzene with polar terminal substituents. PhD thesis (Chem.) Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry of Technology, 2011. 142 p. (in Russ.)].

6. Сонин А. С., Чурочкина Н. А., Казначеев А. В., Голованов А. В. Жидкие кристаллы соединений углерода // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2017. Т. 17, № 3. С. 5–28. [Sonin A.S., Churochkinina N.A., Kaznacheev A.V., Golovanov A.V. Liquid crystals of carbon compounds. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2017, **17** (3), 5–28 (in Russ.)].  
DOI: 10.18083/LCAppl.2017.3.5
7. Патент РФ № RU 96657, U1, МПК G01M7/00, G01M7/06, E01F11/00. Способ измерения и регистрации технико-экономических показателей поверхности покрытия дорожной одежды и функциональный комплекс для его осуществления (варианты) / Приходько В. М., Васильев Ю. Э., Юмашев В. М.; приор. от 04.03.2010. [Patent of Russian Federation №. RU 96657, U1, МПК G01M7/00, G01M7/06, E01F11/00. A way of measurement and registration of technical and economic indicators of a surface of a covering of road clothes and a functional complex for his implementation (options) / Prikhodko V.M., Vasilyev Yu.E., Jumashhev V.M.; prior. from 3/4/2010 (in Russ.)].
8. Мансурова И. А., Копалина О. Ю., Фомин С. В., Хлебов Г. А., Ваганов В. Е., Дьячкова-Машкова Т. П. Влияние строения и химии поверхности углеродных наноструктур на свойства эластомерных композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука // *Изв. вузов. Сер. хим. и хим. технология.* 2013. Т. 56, № 5. С. 77–81. [Mansurova I.A., Kopalina O.Yu., Fomin S.V., Khlebov G.A., Vaganov V.E., Dyachkova-Mashkova T.P. Influence of the structure and chemistry of the surface of carbon nanostructures on the properties of elastomeric compositions based on butadiene-nitrile rubber. *Chemistry and chemical technology*, 2013, **56** (5), 77–81. (in Russ.)].
9. Liliane B. Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review. *Polymer*, 2007, **48**, 4907–4920.
10. Konishi Y., Cakmak M. Nanoparticle induced network self-assembly in polymer-carbon black composites. *Polymer*, 2006, **47**, 5371–5391.
11. Мансурова И. А., Ваганов В. Е., Фомин С. В., Абрамов Д. В., Морозов И. А. Модифицирование технического углерода углеродными наноструктурами и их влияние на структуру и свойства эластомерных композиций // *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2010. Т. 16, № 2. С. 155–165. [Mansurova I.A., Vaganov V.E., Fomin S.V., Abramov D.V., Morozov I.A. Modification of technical carbon by carbon nanomaterials and its influence on structure and properties of elastomeric compositions. *Journal on Composite Mechanics and designs*, 2010, **16** (2), 155–165. (in Russ.)].
12. Патент на изобретение RUS 2307133. Резиновая смесь на основе ненасыщенного карбоцепного каучука / Шилов И. Б., Фомин С. В., Хлебов Г. А., Веснин Р. Л.; заявитель и патентообладатель Вятский гос. ун-т; опубл. 19.04.2006. [Patent RUS 2307133. Rubber mix on the basis of nonsaturated carbon-chain rubber / Shilov I.B., Fomin S.V., Khlebov G.A., Vesnin R.L.; applicant and patent holder Vyatka State Un-t; publ.19.04.2006 (in Russ.)].
13. Штефан Ю. В., Васильев Ю. Э., Беляков А. Б., Понарин Г. А. Модернизация кольцевого стенда «КУИДМ-2» для расширения спектра измеряемых параметров и ускорения испытаний // *Интернет-журнал «Наукоеведение».* 2013. № 6. 16 с. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/108TVN613.pdf> [Stefan Yu.V., Vasil'ev Yu.E., Belyakov A.B., Ponarinn G.A. Road building material testing complex modernization for measuring parameters expansion and experiments acceleration. *Online magazine «Naukovedeniye»*, 2013, 6, 16 p. Electronic resource: <http://naukovedenie.ru/PDF/108TVN613.pdf> (in Russ.)].

Поступила в редакцию 2.11.2017 г.

Received 2 November 2017