

УДК 539.621:53.086:539.5

## ИЗУЧЕНИЕ ТОПОГРАФИИ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МОРОЗОСТОЙКИХ РЕЗИН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

© 2020 г. Т. И. Муравьёва<sup>а, \*</sup>, О. О. Щербакова<sup>а, \*\*</sup>, Д. Л. Загорский<sup>а, b</sup>,  
В. А. Лапицкая<sup>с</sup>, Т. А. Кузнецова<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526 Россия

<sup>б</sup>Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 119991 Россия

<sup>с</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 220072 Беларусь

\*e-mail: muravyeva@list.ru

\*\*e-mail: shcherbakovaoo@mail.ru

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.

После доработки 23.07.2019 г.

Принята к публикации 28.07.2019 г.

Изучены возможности создания морозостойких резин новых типов путем использования углеродных нанотрубок в качестве наполнителя-модификатора эластомерной основы — эпихлоргидринового каучука. Образцы с содержанием нанотрубок 1 и 10% сравнивали с исходным не модифицированным образцом. Методом растровой электронной микроскопии (с элементным анализом) были изучены образцы исходные и после трибологических испытаний. Методом сканирующей зондовой микроскопии были изучены топография поверхности и физико-механические свойства (модуль упругости и адгезия). Показано, что добавление углеродных нанотрубок в эластомер стабилизирует его состав и приводит к структурированию эластомерной основы. Изучение приготовленных после трибологических испытаний срезов образцов позволило выделить несколько областей — тонкий “поверхностный” (толщина 10–15 мкм) и “приповерхностный” слой. Выявлено сильное перераспределение элементов — концентрация серы и цинка значительно увеличивается на поверхности. Показано, что при трибоиспытаниях основные изменения происходят именно в поверхностном слое, а приповерхностный слой трансформируется мало. Установлено, что добавление углеродных нанотрубок приводит к увеличению модуля упругости в приповерхностных слоях.

**Ключевые слова:** эластомеры, трибологические свойства, электронная микроскопия, рентгеноспектральный элементный анализ, атомно-силовая микроскопия.

**DOI:** 10.31857/S102809602004010X

### ВВЕДЕНИЕ

Эластомеры широко используются во многих областях народного хозяйства, поэтому разработка новых композитных материалов представляет большой интерес. В частности, актуальной проблемой является оптимизация свойств резин уплотнительного назначения, эксплуатирующихся в регионах с холодным климатом [1–4]. Эти материалы должны удовлетворять ряду требований — обладать высокой морозостойкостью, выдерживать импульсные нагрузки, высокое давление, иметь повышенные прочностные и релаксационные свойства, обладать стойкостью к агрессивным средам. Для этого очень важен правильный подбор как эластомерной основы, так и соответствующих модификаторов. В качестве основы хорошо подходит эпихлоргидриновый каучук (ЭПХГ), который масло-, нефте-, бензо-, газо-

и озоностойкий как при низких, так и при высоких температурах [5, 6].

В качестве модификатора в работе использовали углеродные нанотрубки (УНТ). Известно, что УНТ в последнее время активно начали применять в качестве наполнителей (модификаторов) различных материалов. В силу особой электронной структуры УНТ способны изменять свойства металлических материалов и сплавов [7]. В ряде работ исследовали добавление УНТ в некоторые эластомеры: благодаря уникальным особенностям [8] они способствуют улучшению эксплуатационных свойств материалов [9–11]. Показано также, что проявляется существенное различие между свойствами в глубине материала и на его поверхности [12]. Это различие можно достоверно определить методами зондовой микроскопии [13, 14]. Однако до настоящего времени влияние

добавления УНТ в эластомеры на основе ЭПХГ на их структуру и свойства практически не оценивали. Также представляет интерес исследование влияния трения на изменение топографии, элементного состава и свойств поверхности композита из ЭПХГ и УНТ. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили образцы эластомеров на основе ЭПХГ, модифицированного различным количеством УНТ. Образцы готовили на оборудовании Plasti-Corder Brabender (синтез проводился в Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова, г. Якутск) [15]. Компоненты смешивали при повышенной температуре и вулканизировали в гидравлическом прессе. Были получены девять образцов, наиболее характерные из них были выбраны для исследования. Образец № 1 был изготовлен из базового ЭПХГ, а образцы № 2 и № 3 содержали в своем составе 1 и 10 массовых частей УНТ соответственно. Помимо поверхности изучали и приповерхностные слои образцов, для чего были приготовлены торцевые срезы.

Трибологические испытания были выполнены на трибометре УМТ-2, оборудованном низкотемпературной камерой, моделирующей режим эксплуатации эластомеров в реальных условиях. Испытания проводили при контактном давлении до 0.3 МПа, скорости скольжения до 100 мм/с и объемной температуре от  $-25$  до  $22^{\circ}\text{C}$ . Методика испытаний подробно описана в [16]. Ниже приведены результаты, полученные после трибоиспытаний при минимальной температуре.

Поверхностные и приповерхностные слои (на срезах) образцов изучали до и после трибологических испытаний. В исследовании применяли различные методы микроскопии. Морфологию поверхности изучали в растровом электронном микроскопе (РЭМ) FEI Quanta 650 при ускоряющем напряжении 25 кВ и увеличении от  $200\times$  до  $20000\times$ . Использовали детекторы вторичных и обратно отраженных электронов. Для определения элементного состава образцов применяли энергодисперсионный рентгеновский анализатор EDAX, входящий в комплектацию микроскопа. Исследуемые образцы являются диэлектриками, поэтому был выбран специальный низковакуумный режим микроскопа. В этом режиме в качестве рабочей среды использовали разреженный водяной пар при давлении 15–20 Па. Отметим, что применение этого режима позволило избежать металлизации поверхности (известно, что при металлизации эластомеров возможно повреждение их поверхности и изменение ее элементного состава).

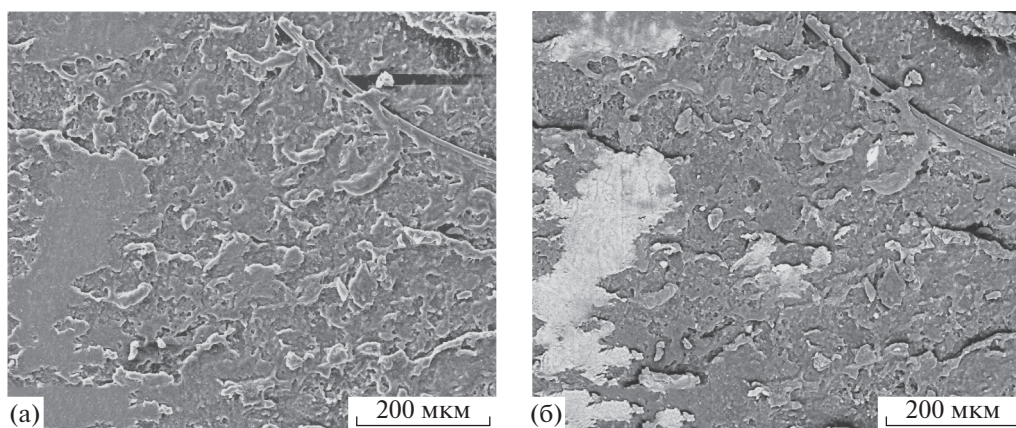
Морфологию и механические свойства поверхности эластомеров исследовали методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) с помощью атомно-силового микроскопа Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM с использованием стандартных кремниевых кантилеров типа NSC-11 (производство MicroMash, Эстония) с радиусом кривизны острия зонда 14 нм и жесткостью консоли 8.61 Н/м. Изучали поверхность торцевых срезов (на разной глубине) образцов № 1 и № 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

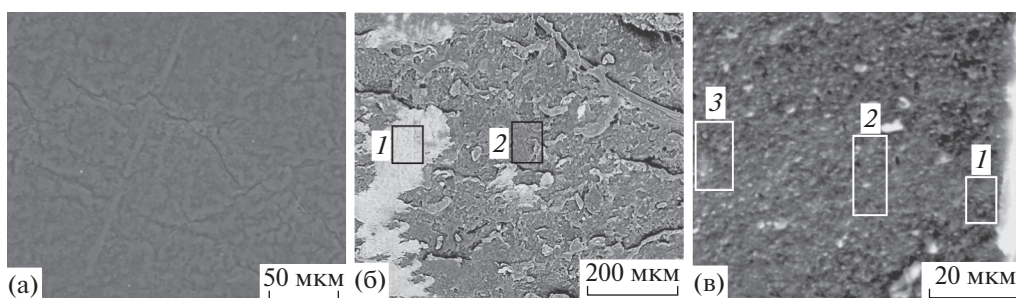
### *Электронная микроскопия*

При проведении электронно-микроскопических исследований изображения получали с использованием двух детекторов (вторичных и обратно отраженных электронов). Детекторы работали одновременно, что позволило визуализировать различные особенности топографии поверхности изучаемых объектов. На рис. 1 в качестве примера представлены результаты, полученные для образца № 1. Из рисунка видно, что изображения дают близкую информацию о топографии поверхности. Вместе с тем полученные картины несколько различаются: использование детектора обратно отраженных электронов позволяет сразу же визуализировать различные фазы на поверхности образца. Поэтому далее представлены только результаты исследования, полученные в режиме детектирования обратно отраженных электронов.

На рис. 2 приведены РЭМ-изображения поверхности базового образца № 1 до и после испытаний, а также торцевого среза после испытаний. В табл. 1 дан соответствующий элементный состав. Анализ результатов показывает, что исходная поверхность достаточно гладкая, а после испытаний становится более развитой. Также на поверхности после испытаний появились фазы, различающиеся по “цвету” и элементному составу. “Светлые” области близки по составу к исходной поверхности, “темные” сильно отличаются от нее. Это можно объяснить характером взаимодействия с контртелом: поверхность образца неровная и контакт при трении происходит не по всей площади. Светлые области соответствуют минимальному контакту с контртелом, а более темные области являются контактными поверхностями. Из полученных результатов следует, что параметры поверхности эластомеров без УНТ сильно изменяются в процессе трения. Также выявлено перераспределение элементов, происходящее после испытаний. В целом, в результате трибоиспытаний на поверхности увеличивается содержание углерода и кислорода и снижается содержание серы и цинка. Анализ торцевого среза образца позволяет выделить “приповерхност-



**Рис. 1.** РЭМ-изображение поверхности области образца № 1 после трибологических испытаний, полученное в режиме детектирования: а – вторичных электронов; б – обратно отраженных электронов.



**Рис. 2.** РЭМ-изображения образца № 1: а – исходная поверхность; б – поверхность после испытаний; в – торцевой срез после испытаний (выделены области элементного анализа).

ный” слой толщиной около 20 мкм, его состав близок к составу поверхности и заметно отличается от состава в объеме.

Результаты исследования образцов, содержащих различное количество УНТ, приведены ниже: на рис. 3 и 4 представлены изображения поверхности (исходной и после трибоиспытаний) и торцевых срезов образцов № 2 и № 3. В табл. 2 и 3 приведен соответствующий элементный состав.

Отметим, что у эластомеров, модифицированных УНТ, на поверхности также имеются области, различающиеся на РЭМ-изображениях топографией и “цветом”. Их наличие связано, очевидно, с зонами контакта трущихся поверхностей. Элементные составы этих областей практически не различаются.

Как и в случае образца № 1, исходная поверхность гладкая, а после трибоиспытаний она ста-

**Таблица 1.** Химический состав образца № 1

Поверхность	Исслед. участки	Содержание элементов, мас. %											
		C	N	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Zn
Исходная	Весь	35.3	8.6	2.8	0.5	0.4	0.1	34.3	1.6	–	0.3	–	16.1
После испытаний	1	48.5	5.1	7.3	0.7	0.5	0.2	23.5	2.4	–	0.1	–	11.7
	2	71.6	2.6	11.2	1.9	1.2	0.3	4.6	3.4	–	0.3	–	2.9
	Весь	65.1	3.7	12.5	1.5	0.8	0.2	8.1	3.3	–	0.3	–	4.5
Срез	1	56.3	0.1	5.7	0.1	0.6	0.1	10.2	13.6	0.2	2.9	0.7	9.5
	2	72.6	2.9	12.2	1.3	0.9	0.1	3.4	3.7	0.1	0.3	0.1	2.4
	3	76.3	0.6	8.8	0.9	0.8	–	3.7	5.5	0.1	0.1	0.1	3.1

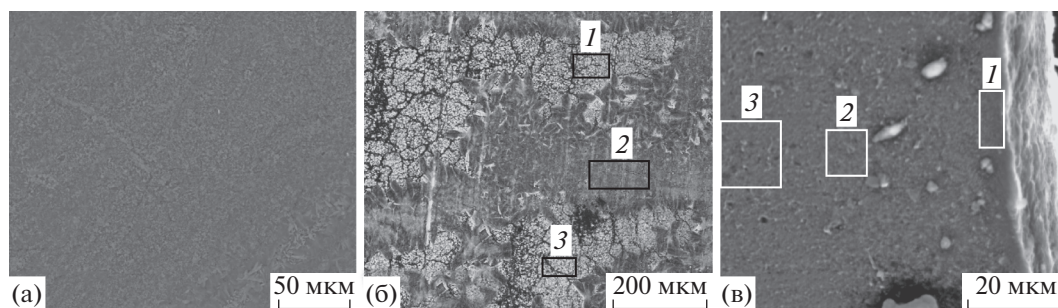


Рис. 3. РЭМ-изображения образца № 2: а – исходная поверхность; б – поверхность после испытаний; в – торцевой срез после испытаний (выделены области элементного анализа).

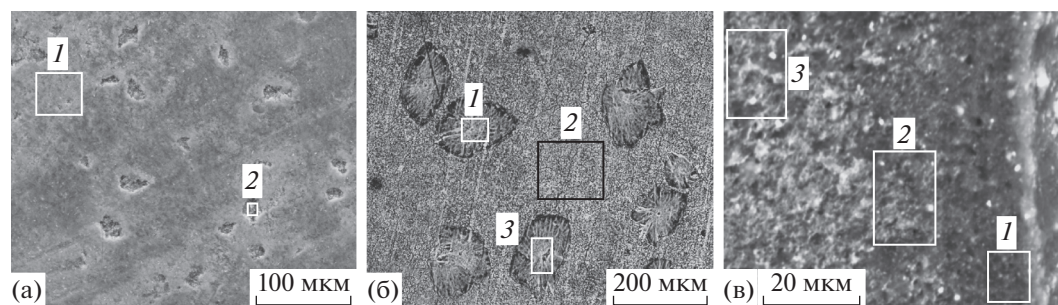


Рис. 4. РЭМ-изображения образца № 3: а – исходная поверхность; б – поверхность после испытаний; в – торцевой срез после испытаний (выделены области элементного анализа).

новится неоднородной. Видно, что добавление даже 1% УНТ существенно модифицирует свойства: химический состав контактной поверхности после испытаний практически не изменился по сравнению с исходной поверхностью. Добавление 10% УНТ несколько трансформирует топографию поверхности – визуально она становится более плотной и гладкой, вместе с тем на ней появляются равномерно распределенные каверны. Следует отметить, что топография и состав поверхности образца, модифицированного 10% УНТ, после испытаний практически не изменился.

Анализ среза показывает, что состав приповерхностного слоя практически не отличается от состава в объеме. Значительные изменения происходят лишь в очень тонком “поверхностном” слое, однако оценить эти изменения не удалось из-за его малой толщины – не более нескольких микрон.

Сравнение среза и поверхности позволяет сделать вывод о большом различии в концентрациях серы и цинка – на поверхности их содержание значительно выше, чем в объеме. Большой интерес представляет содержание углерода: приведен-

Таблица 2. Химический состав образца № 2

Поверхность	Исслед. участки	Содержание элементов, мас. %												
		C	N	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Co	Zn
Исходная	Весь	36.9	9.8	6.5	1.6	1.1	0.2	25.6	4.7	–	0.2	–	0.1	13.3
После испытаний	1	40.5	9.6	7.2	1.0	1.1	0.2	22.6	4.2	–	0.2	–	0.1	13.3
	2	36.8	9.7	8.9	1.5	1.4	0.3	22.9	5.4	–	0.1	–	0.2	12.8
	3	35.1	7.7	6.1	0.9	0.8	0.3	29.2	3.3	–	0.4	–	0.1	16.1
	Весь	41.9	8.9	9.1	1.1	1.1	0.4	20.8	4.2	–	0.2	–	0.1	12.2
Срез	1	68.8	0.8	12.1	1.0	0.9	0.1	5.5	5.2	0.1	0.5	0.5	0.1	4.4
	2	72.5	1.2	10.5	1.3	0.9	0.1	4.5	5.8	0.1	0.3	0.2	0.1	2.5
	3	72.1	1.3	10.3	1.6	1.2	0.1	4.5	5.1	0.1	0.1	0.1	0.1	3.4

**Таблица 3.** Химический состав образца № 3

Поверхность	Исслед. участки	Содержание элементов, мас. %												
		C	N	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Co	Zn
Исходная	1	37.8	12.3	4.9	0.5	0.4	0.1	27.7	3.2	–	0.1	–	0.1	12.9
	2	36.6	14.4	5.4	0.4	0.5	0.2	25.8	3.1	–	0.9	–	0.1	12.6
	Весь	38.9	12.5	6.1	0.6	0.6	0.1	25.6	3.4	–	0.1	–	0.2	11.9
После испытаний	1	32.2	6.5	5.8	0.4	0.3	0.1	36.3	1.7	–	0.1	–	0.2	16.4
	2	36.9	9.1	8.1	0.9	0.8	0.4	26.4	2.8	–	0.3	–	0.2	14.1
	3	32.9	6.3	5.5	0.2	0.2	0.1	36.8	1.4	–	0.1	–	0.2	16.3
	Весь	37.9	9.6	8.5	0.9	0.7	0.4	25.7	2.7	–	–	–	0.2	13.4
Срез	1	75.6	0.3	7.9	0.9	0.9	–	3.6	5.4	0.1	0.2	0.1	0.3	4.7
	2	73.9	2.2	10.3	1.2	1.1	0.1	3.2	4.6	0.1	0.2	0.3	0.2	2.6
	3	76.2	2.1	10.1	1.2	1.1	0.1	2.9	3.6	0.1	0.1	0.1	0.1	2.3

ные данные, казалось бы, свидетельствуют о том, что его содержание на поверхности значительно меньше, чем в объеме. Однако здесь необходимо учитывать и присутствие других элементов – серы и цинка, сильное увеличение концентрации которых на поверхности приводит к относительному снижению доли углерода. В целом выводы о концентрации углерода сделать достаточно сложно в силу ряда причин: невозможности точно определить содержание легких элементов методом энергодисперсионного анализа, использования “масляного” насоса и углеродного скотча в РЭМ.

#### Зондовая микроскопия

Были исследованы поверхности срезов образцов № 1 и № 2 в “приповерхностном” слое (расстояние 10–15 мкм от поверхности трения) и на глубине. Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволил, помимо топографии, оценить упругие и адгезионные свойства поверхностей. Полученные АСМ-изображения продемонстрированы на рис. 5 и 6. Численные значения модуля упругости и силы адгезии представлены в табл. 4.

Данные СЗМ свидетельствуют о том, что поверхность на срезе немодифицированного образца имеет более развитый рельеф. Так  $R_a$  (параметр шероховатости) образца без УНТ у поверхности составляет 114 нм, на глубине – 119 нм. При добавлении 1% УНТ у поверхности  $R_a$  составляет 77.8 нм, а на глубине – 82.6 нм. На изображениях приповерхностного слоя исходного образца ЭПХГ видна текстура, возникающая в результате деформации данной зоны (рис. 5а). В глубине материала текстуры нет, округлые зерна диаметром от 0.2 до 2 мкм выступают из матрицы (рис. 5б). Скоплениям этих выступающих зерен соответствуют на карте модуля упругости более высокие значения (рис. 5в, 5г). Модули упругости не мо-

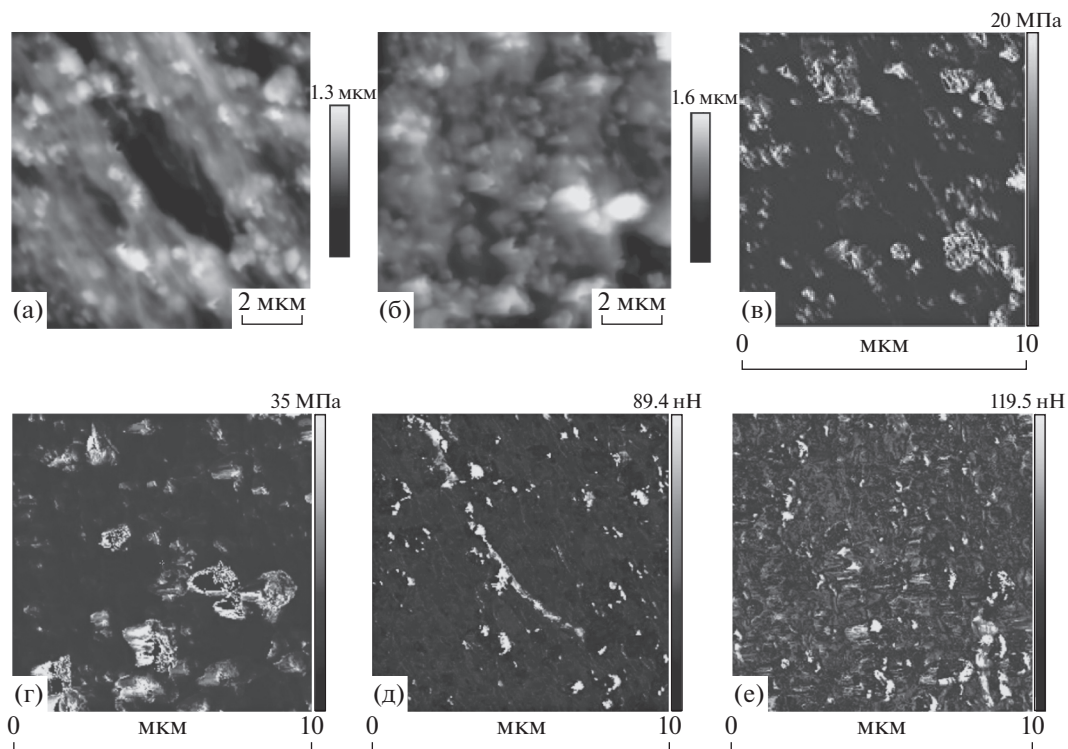
дифицированного образца № 1 у поверхности и на глубине заметно различаются – модуль упругости вблизи поверхности примерно в шесть раз меньше, чем “в объеме” (табл. 4).

Силы адгезии у поверхности и в глубине немодифицированного образца различны: в приповерхностном слое они ниже, что можно объяснить некоторым уплотнением приповерхностного слоя при деформации. Следует учесть, что измерения адгезии на воздухе фактически проводятся в тонком слое воды, адсорбирующейся на исследуемом образце: уменьшение “поверхностной пористости” при уплотнении может снижать количество влаги и влиять на значение определяемой силы адгезии. Распределение “пятен” с повышенными значениями сил адгезии в исходном образце неравномерно и приблизительно одинаково как в приповерхностном слое, так и в глубине материала.

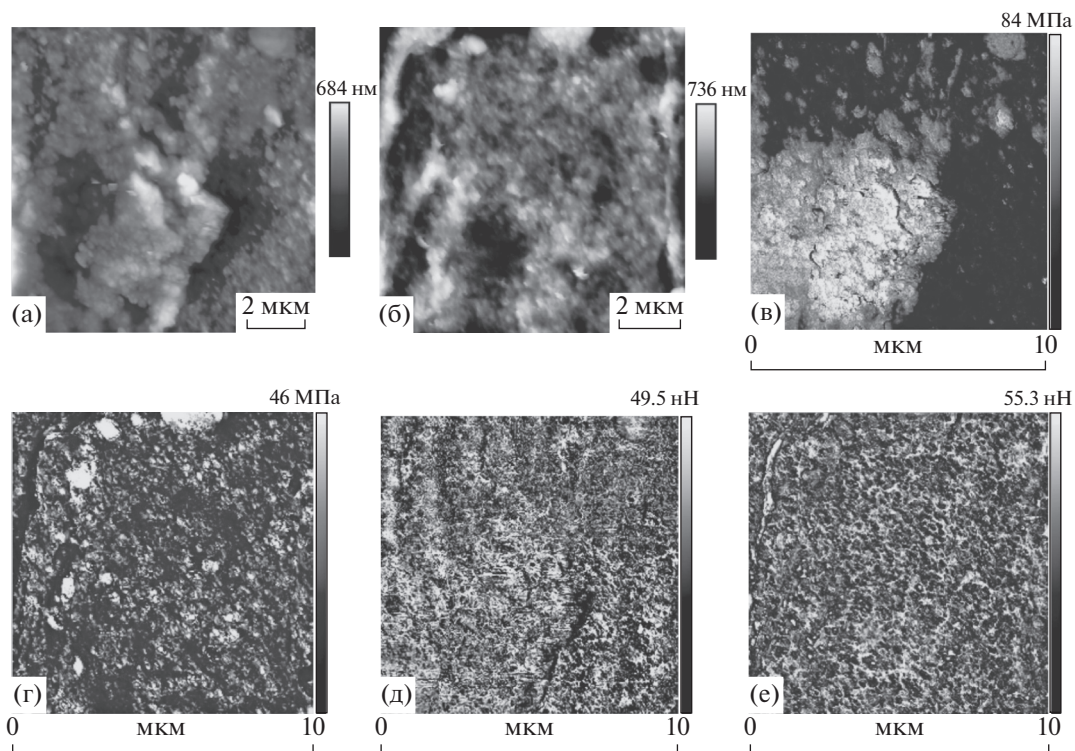
Добавление 1% УНТ к ЭПХГ кардинально меняет его микроструктуру (рис. 6). В отличие от зерен размером от 0.2 до 2 мкм в матрице, весь срез модифицированного образца состоит из одно-

**Таблица 4.** Модуль упругости и сила адгезии на поверхности срезов исходного образца ЭПХГ и модифицированного 1% УНТ

образец	Модуль упругости, МПа	
	у поверхности трения	в глубине
1	5.8	33.1
2	82.4	45.1
Адгезия, нН		
образец	у поверхности трения	в глубине
1	88.5	115.9
2	45.8	54.2



**Рис. 5.** АСМ-изображения среза образца № 1 исходного ЭПХГ: а – топография вблизи поверхности; б – топография в объеме; в – модуль упругости вблизи поверхности; г – модуль упругости области в объеме; д – адгезия вблизи поверхности; е – адгезия в объеме.



**Рис. 6.** АСМ-изображения среза образца № 2 ЭПХГ, модифицированного 1% УНТ: а – топография вблизи поверхности; б – топография в объеме; в – модуль упругости вблизи поверхности; г – модуль упругости в объеме; д – адгезия вблизи поверхности; е – адгезия в объеме.

родных зерен диаметром 100 нм (рис. 6а, 6б) – и у поверхности, и в глубине материала. Отличие приповерхностного слоя в том, что под действием деформации образуются крупные блоки из этих зерен (рис. 6б) размером от одного до десятков микрон. Они обладают повышенными значениями модуля упругости по отношению ко всей поверхности среза. В объеме модифицированного ЭПХГ области с повышенными значениями модуля упругости распределены равномерно, их размер составляет от 100 нм до 1 мкм. Модуль упругости модифицированного образца № 2 у поверхности больше объемного примерно в два раза. На карте адгезионных сил в модифицированном образце (рис. 6д, 6е) видны дисперсные области с повышенными значениями адгезионных сил – размер областей порядка 100 нм, и они распределены равномерно по всему образцу. Отметим, что во внутренней области модифицированного образца они распределены более равномерно. Значения адгезионных сил в приповерхностном слое и в объеме модифицированного образца близки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет выделить “поверхностный слой” (толщиной 2–3 мкм) и “приповерхностный слой” (15–25 мкм). “Поверхностный слой” четко виден на РЭМ-изображениях, однако из-за его малой толщины провести количественные измерения не удалось. Методом РЭМ и СЗМ изучали “приповерхностный слой” срезов. Установлено, что “приповерхностный слой” образца № 1 (без УНТ) значительно отличается от объема – он деформируется, и в нем происходит перераспределение элементов. У эластомеров, модифицированных УНТ (образцы № 2 и № 3), сильно изменен лишь тонкий “поверхностный слой”, а элементный состав “приповерхностного слоя” приближен к составу в объеме. Малые добавки (1% УНТ) заметно изменяют свойства эластомера. Изменяется как объем, так и (в большей степени) поверхность. Очевидно, что введение УНТ приводит к структурированию эластомерной основы. Можно сделать вывод о том, что введение УНТ в эластомер стабилизирует его состав (испытания изменяют химический состав только на поверхности, мало затрагивая приповерхностные слои).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н.Н. Петровой за предоставленные морозостойкие резины, И.В. Шкалею за проведение трибологических испытаний. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00615) (проведение электронно-микроскопических исследо-

ваний) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф18Р-239) (проведение исследований с использованием зондовой микроскопии).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Говорова О.А., Вишницкий А.С., Чубарова А.С., Морозов Ю.Л.* // Каучук и резина. 1999. № 2. С. 18.
2. *Портнягина В.В., Петрова Н.Н., Заровняев Б.Н.* // Горный информационно-аналитический бюлл. (науч.-тех. журн). 2014. № 9. С. 371.
3. *Румянцев А.В., Клочков В.И., Курлянд С.К., Хвостик Г.М.* // Молодой ученый. 2014. № 14.1. С. 39.
4. *Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Куриллов В.Н.* // Тр. ВИАМ. 2013. № 1. С. 5.
5. *Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М. и др.* // Перспективные материалы. 2015. № 11. С. 5.
6. *Петрова Н.Н., Попова А.Ф., Федотова Е.С.* // Каучук и резина. 2002. № 3. С. 6.
7. *Жданок С.А., Свириденко А.И., Игнатовский М.И. и др.* // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83. № 1. С. 3. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0312-8>
8. *Портнягина В.В., Петрова Н.Н.* // Каучук и резина. 2014. № 6. С. 40.
9. *Морозов А.В., Петрова Н.Н.* // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 2. С. 162.
10. *Морозов А.В., Муравьева Т.И., Петрова Н.Н. и др.* // Каучук и резина. 2015. № 6. С. 24.
11. *Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю., Морозов А.В., Степанов Ф.И.* Трение эластомеров: модулирование и эксперимент. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2017. 204 с.
12. *Sukhanova T.E., Kuznetsova T.A., Lapitskaya V.A. et al.* Characterization of Multiblock (Segmented) Copolyurethane-Imides and Nanocomposites Based Thereof Using AFM, Nanotribology, and Nanoindentation Methods // Atomic Force Microscopy and Its Applications, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78625>
13. *Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Chizhik S.A. et al.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2018. V. 443. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/443/1/012019>
14. *Kuznetsova T.A., Zubar T.I., Lapitskaya V.A. et al.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2017. V. 256. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/256/1/012022>
15. *Shcherbakova O.O., Muravyeva T.I., Gainutdinov R.V. et al.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2018. V. 443. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/443/1/012030>
16. *Столярова О.О., Муравьева Т.И., Гайнутдинов Р.В. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 46. <https://doi.org/10.1134/S1027451016050141>

## Study of the Topography and Properties of Surface Layers of Frost-Resistant Rubber Modified by Carbon Nanotubes

T. I. Muravyeva<sup>1, \*</sup>, O. O. Shcherbakova<sup>1, \*\*</sup>, D. L. Zagorskiy<sup>1, 2</sup>, V. A. Lapitskaya<sup>3</sup>, T. A. Kuznetsova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526 Russia*

<sup>2</sup>*Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991 Russia*

<sup>3</sup>*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS Belarus, Minsk, 220072 Belarus*

*\*e-mail: muravyeva@list.ru*

*\*\*e-mail: shcherbakovaoo@mail.ru*

The possibilities of creating new type frost-resistant rubbers by using carbon nanotubes as filler-modifiers for an elastomeric base (epichlorohydrin rubber) were studied. Samples with a nanotube content of 1 and 10% were compared with the initial unmodified sample. Tribological tests were performed. The method of electron microscopy (with elemental analysis) was used to study the initial sample and the samples after tribological tests. The method of scanning probe microscopy was used to study surface topography and physico-mechanical properties (modulus of elasticity and adhesion). The addition of carbon nanotubes to the elastomer was shown to stabilize its composition and to result in the structuring of the elastomeric base. The study of the sample slices prepared after tribological testing made it possible to distinguish different areas: thin “surface” (thickness 10–15 μm) and “near-surface” layers. A strong redistribution of elements was detected, i.e., the concentration of sulfur and zinc increased significantly on the surface. It was shown that during tribological tests, the main changes occurred mostly in the surface layers, while the near-surface layers changed not so significantly. The addition of carbon nanotubes was found to result in an increase in the elastic modulus in the near-surface layers.

**Keywords:** elastomers, tribological properties, electron microscopy, X-ray spectral elemental analysis, atomic force microscopy.