

# ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ СИЛИКОНОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ, НАПОЛНЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

М.И. Тулепов<sup>1</sup>, Ж.К. Мышырова<sup>1\*</sup>, Р. Бускетс<sup>2</sup>, С. Азат<sup>1</sup>, Л. Сасыкова<sup>1</sup>,  
Г.О. Турешова<sup>1</sup>, Б.У. Рахимова<sup>1</sup>, А.О. Жапекова<sup>1</sup>, Г.А. Спанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Кингстонский университет, Пенрин Роуд 55-59, Кингстон, Великобритания

## Аннотация

Электропроводящие герметики и покрытия представляют большой интерес в последние годы в связи с развитием электроники и технологий. В данной области ведется множество исследований по изучению электропроводящих свойств композитов, наполненных различными углеродными материалами. Однако существует не так много исследований, где используются силоксаны в качестве матриц. Целью данной работы явилось получение недорогого электропроводящего композита с использованием силиконовой матрицы и углеродных наполнителей: технического углерода, графита, угля. Наилучшим наполнителем для электропроводящего герметика послужил технический углерод (30 масс.%), продемонстрировавший электропроводимость  $1,11 \times 10^2 \text{ (Ом} \times \text{м)}^{-1}$ . Однако увеличение содержания технического углерода в матрице отрицательно сказалось на физико-механических свойствах, условная прочность при разрыве уменьшилась на 42%, относительное удлинение при разрыве на 37%. Полученный композит можно использовать в качестве электропроводящего герметизирующего материала, однако при необходимости сохраняется улучшения физико-механических характеристик.

*Ключевые слова:* герметизирующие материалы, углеродные материалы, силоксаны, удельное сопротивление, технический углерод.

## 1. Введение

Основным предназначением приборных электропроводящих герметиков является герметизация швов и стыков между различными элементами или материалами, а также придание экранирующих свойств оборудованию. Герметизация достигается тогда, когда герметизирующий материал создает прочное соединение с основанием, а также способен поглощать механические нагрузки шва, не разрушаясь и не отрываясь от основания. Чтобы обеспечить длительный срок службы герметика необходимо хорошо знать химические и физические свойства выбранного материала. Среди огромного количества разнообразных герметиков, которые можно найти на рынке, силиконовые герметики особенно ценятся за их эластичность, также они имеют самый широкий диапазон рабочих температур. Рассматривая

требования к герметизации при производстве электронной техники, приборостроения, силиконовые герметики обладают наиболее высокими эксплуатационными характеристиками. Их можно использовать при температурах от  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Считается, что срок службы силиконов превышает 20 лет.

Электропроводящие силиконовые покрытия, герметики, клеи представляют собой композиционные материалы, состоящие из полимерной матрицы и электропроводящего наполнителя. Коммерческие электропроводящие герметики в большинстве имеют в своем составе в качестве наполнителей нано- и микрочастицы металлов (медь, никель, серебро). Рынок электропроводящих герметиков представлен зарубежными фирмами, такими как *Laird Technologies*, *Parker Chomerics (Chobond)*, *Kemtron*, *Holland Shielding Systems BV*, *Dow Corning*, *Expan* и т.д. Благодаря физико-механи-

\*Ответственный автор  
E-mail: Myshyrovazhanat@gmail.com (Ж.К. Мышырова)

ческим свойствам проводящие полимерные композиты на основе силиконового каучука привлекают большое внимание применением их в производстве гибких электронных устройств, в приборостроении в аэрокосмической области. Особенно высокий интерес наблюдается в производстве аэрокосмических электропроводящих герметиков. У *Dow Corning* представлена целая линия продуктов для применения в солнечной энергетике, включая герметики. К примеру, разработанный герметик на основе силикона *Dow Corning® PV-5802* демонстрирует высокие электрические (низкие потери между ячейками) и эксплуатационные характеристики (долговечность, способность мини-модулей выдерживать более 600 термоциклов и 2000 часов работы, во влажных и теплых условиях) [1].

Множество исследований существует в области электропроводящих композиционных материалов, в качестве матрицы которых используются различные полимеры и смолы [2-5,], а в качестве наполнителей – углеродные наноматериалы: технический углерод, графен и углеродные нанотрубки (УНТ) [6-11].

Наибольшее количество работ посвящено наполнению различных матриц УНТ [6, 9, 10, 11], при этом были получены материалы с различными тепло- и электропроводящими свойствами. Существует не так много исследований, где используют силиконовую матрицу. Так, в работе [10] были получены супергидрофобные, электропроводящие силиконовые покрытия с краевым углом смачивания до величины  $158,4^\circ$  для образца с 50 мас.% нанотрубок и поверхностным сопротивлением  $11^{23} \text{ Ом}\cdot\text{кв}^{-1}$ . В качестве силиконовой матрицы использовался коммерческий герметик холодного отверждения фирмы Henkel, краевой угол смачивания которого составил  $113,5^\circ$ .

Ряд исследований был посвящен созданию нанокompозитов, наполненных УНТ и техническим углеродом [12, 13]. В работе [13] был получен новый гибридный наполнитель сажа-углеродные нанотрубки. Гибридный наполнитель улучшил механические свойства силиконовых каучуковых композитов и значительно повысил их электропроводность. Наиболее высокие физико-механические свойства (прочность на разрыв - 4,5 МПа и относительное удлинение при разрыве - 211%) продемонстрировал композит с содержанием 5,76% мас. гибридного наполнителя. Минимальный порог кондуктивной перколяции и максимальная электропроводимость композита соответ-

ственно составили 0,24% и 248,8 См/м. Кроме того, было отмечено, что композит обладает высокой чувствительностью к деформациям.

Также ряд работ посвящен наполнению композитов графитом [14], смеси графита с УНТ [15]. К примеру, в работе [15] была предложена возможность использования кремний-органического полимера, наполненного графитом и УНТ, в качестве электронагревателя, где максимальная температура нагрева составила  $102^\circ\text{C}$ .

Но наиболее часто используемым наполнителем остается технический углерод в виду недорогой стоимости, и хороших показателей электропроводимости [16-18].

Композиции, наполненные техническим углеродом, имеют ряд своих особенностей. Удельное сопротивление композита, наполненного техническим углеродом, может меняться при изменении типа полимера, это можно заметить в области критических концентраций. Множество данных подтверждает, что меньшее сопротивление проявляют связующие, которые обладают низким родством к наполнителю: меньшей вязкостью и неопределенностью. Данные условия способствуют образованию большего числа связей наполнитель-наполнитель и меньшему связующее-наполнитель, сохраняя структуру углерода. Например, для резин в ряду каучук бутадиен-нитрильный СКН-26, синтетический каучук изопреновый СКИ-3, бутилкаучук, натуральный каучук НК, полихлорпреновый каучук ПХП, комбинация СКН-26 с полиизобутиленом, содержащих 50 масс.ч. ацетиленового технического углерода, удельное сопротивление возрастает. Но данная тенденция не сохраняется при более низких концентрациях технического углерода или при использовании других видов технического углерода. Можно отметить что кристаллизующиеся полимеры обладают более низким удельным сопротивлением [19].

Также имеют влияние технология переработки, параметры изготовления и переработки смешивания, получения электропроводящих композитов [19]. Процесс смешения и диспергирования, происходящий в жидких смолах или растворах полимеров, не приводит к значительным изменениям или разрушениям структуры технического углерода, так как отсутствуют напряжения сдвига, какие можно наблюдать при других видах приготовления композиций.

Таблица 1. Свойства углеродных наполнителей и силиконовой матрицы

Наполнители	Удельная геометрическая поверхность	pH	Зольность, %
Технический углерод	92 м <sup>2</sup> /г	3,7-4,5	не более 0,05
Графит марки ГЛ-1 серебристый	содержание углерода Не менее 90%	-	не более 13
Активированный уголь марки БАУ-А	суммарный объем пор по воде, см <sup>3</sup> /г не менее 1,6	-	не более 0,6
Силиконовый герметик	условная прочность при разрыве не менее 0,8 МПа	относительное удлинение при разрыве не менее 100%	термоустойчивость от -40 °С до +300 °С

И здесь связующие на основе силоксанов имеют некоторое преимущество, так как обладают низкой чувствительностью к технологии переработки за счет низкой вязкости, которая обеспечивает низкие значения сдвиговых напряжений при различных технологических операциях, и низким родством к наполнителю.

## 2. Экспериментальная часть

В качестве матрицы использовался силиконовый герметик прокладок нейтрального типа *Master Klein*, обладающий следующими характеристиками: коррозионностойкостью; стойкостью к воздействиям масла, антифриза, воды; термостойкостью до 300 °С. В качестве растворителя использовался н-гексан. В качестве наполнителей – технический углерод марки К 354 канальный, имеющий высокие показатели дисперсности и низкую структурность, графит марки ГЛ-1 серебристый и активированный уголь марки БАУ-А. Основные физико-химические свойства силиконовой матрицы и углеродных наполнителей даны в таблице 1.

Для получения необходимых образцов графит, технический углерод, активированный уголь диспергировали в ультразвуковой ванне в н-гексане, далее в полученную суспензию добавлялась силиконовая матрица. Полученные композиции заливались в прямоугольную форму. Затем полученные образцы сушили в термошкафу при 60 °С. Определяли удельное объемное сопротивление по ГОСТ Р 50499-93 с использованием тераомметра Е6-13А. Объемное удельное сопротивление образца  $\rho_v$  в Ом×м вычисляли по формуле:

$$\rho_v = \frac{R_x \times A}{h}$$

где  $R_x$  – объемное сопротивление, Ом;  $A$  – эффективная площадь защищенного электрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – средняя толщина образца, м.

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v}, \quad (\text{Ом} \times \text{м}^{-1})$$

Удельную объемную электропроводность  $\sigma$  рассчитывали по формуле:

Принципиальная схема соединения защищенных электродов для измерения удельного объемного сопротивления представлена на рис. 1.

Физико-химические свойства углеродных наполнителей и силиконовой матрицы согласно их паспортным данным представлены в таблице 1.

Структура электропроводящих композитов была проанализирована с помощью растрового электронного микроскопа *Quanta 3D 200i Dual system, FEI* и оптического микроскопа *Leica DM 6000 M*. Физико-механические свойства определялись по ГОСТ 21751-76.

## 3. Обсуждение результатов

При помощи ИК спектроскопии были изучены спектры исследуемых углеродных наполнителей. Данные наполнители очень схожи по структуре, которая представляет собой сопряженную систему углеродных связей, из-за малой интенсивности поглощения подобных малополярных структур спектры харак-

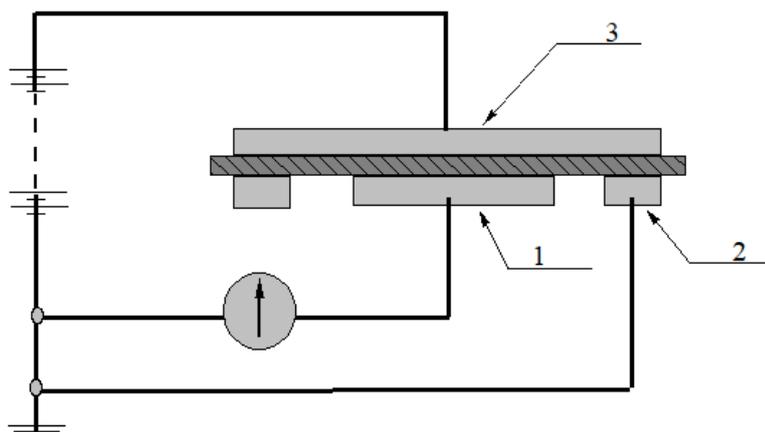


Рис. 1. Принципиальная схема соединения защищенных электродов для измерения удельного объемного сопротивления: 1 – защищенный (измерительный) электрод; 2 – защитный (охранный) электрод; 3 – незащищенный электрод (электрод напряжения).

теризуются широкими и малоинтенсивными полосами поглощения. На рис. 2 представлены ИК-спектры активированного угля, графита и технического углерода, интенсивные полосы поглощения при  $1560-1600\text{ см}^{-1}$  обуславливают колебания  $-C=C-$  связей в полиароматических слоях технического углерода, активированного угля, графита и разделяющие эти связи полосы, группы  $C-C$  широкие и малоинтенсивные, можно наблюдать при  $1000-800\text{ см}^{-1}$  [20, 21]. Можно наблюдать широкие малоинтенсивные полосы в области  $3200-3600\text{ см}^{-1}$ , которые указывают на присутствие групп  $OH$ .

Были получены композиционные материа-

лы на основе силиконовой матрицы, включающие в своем составе углеродные наполнители. Содержание наполнителей в составе композитов изменялось от 5 до 30 мас.%. Композиты с электропроводностью выше  $10^{-2}\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  относят к токопроводящим материалам [22], поэтому данное значение было ориентировочным для получаемых композитов.

Были исследованы электрические свойства полученных композитов в зависимости от природы и содержания углеродного наполнителя. Введение углеродного наполнителя привело к значительному изменению электропроводимости силиконового композита. Исходный

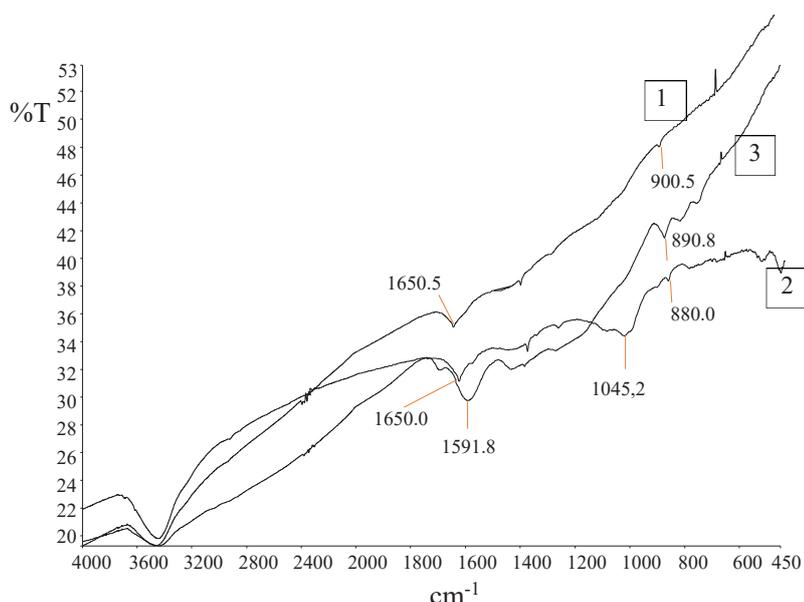


Рис. 2. ИК-спектры углеродных наполнителей: 1 – активированный уголь; 2 – графит; 3 – технический углерод.

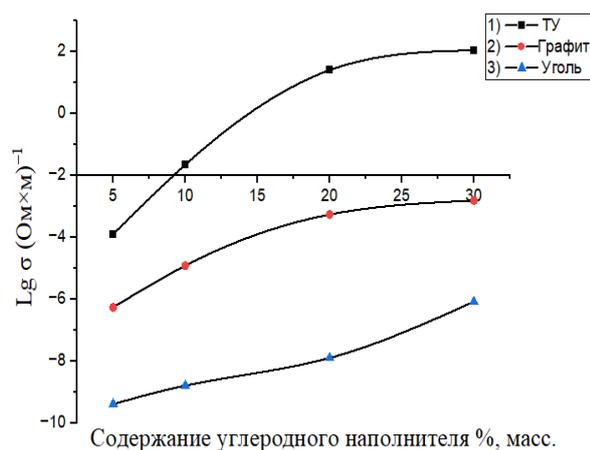


Рис. 3. Зависимость логарифма электропроводности  $\sigma$  композитов на основе силиконовой матрицы от содержания углеродного наполнителя: 1 – технический углерод; 2 – графит; 3 – активированный уголь.

герметик представлял собой типичный диэлектрик с удельным объемное электрическим сопротивлением  $10^{12}$   $\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Наполненный техническим углеродом композит продемонстрировал относительно высокую электропроводность  $1,11 \times 10^2$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ , проявив себя проводником.

На рис. 3, представлены результаты электропроводности изученных композитов в зависимости от содержания углеродного наполнителя. Было установлено, что электропроводность значительно зависит от содержания наполнителя.

С увеличением углеродного наполнителя в композиционном материале от 5 до 30 мас.% наблюдалось закономерное повышение его электропроводности от  $10^{-9}$ – $10^{-4}$  до  $8,3 \times 10^{-6}$  –  $1,11 \times 10^2$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ . Данная тенденция наблюдается для всех видов углеродного наполнителя. При дальнейшем увеличении содержания наполнителя (до 30 масс.%) заметного изменения электропроводности уже не наблюдалось.

Среди полученных композитов наиболее высокую электропроводность до  $1,11 \times 10^2$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  продемонстрировал образец наполненный техническим углеродом, с содержанием 30 масс.%, в то время как материалы наполненные графитом и углем, обладали более низкими значениями параметра  $\sigma$ , не более  $1,5 \times 10^{-3}$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  и не более  $8,3 \times 10^{-6}$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  (рис. 3). Низкая проводимость графита и активированного угля обусловлена поликристаллической структурой и содержанием аморфного углерода.

Таким образом, исходя из эксперименталь-

ных данных, можно утверждать, что природа наполнителя значительно влияет на электропроводность композита. Также, по-видимому, имеет значение дисперсность наполнителя, наиболее эффективным электропроводящим материалом проявил себя технический углерод с нанометровым размером частиц (около 18,2 нм), характеризующийся также более высокой дисперсностью по сравнению с другими углеродными наполнителями.

В качестве электропроводящего герметизирующего материала со значениями  $\sigma > 10^{-2}$   $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  с достаточно небольшим содержанием наполнителя применим образец с содержанием технического углерода более 30 мас.% (рис. 3).

На рис. 4 представлены микроснимки матрицы и композита наполненного техническим углеродом. На рис. 4, а, б, с представлены микрофотографии силиконовой матрицы без наполнителя, композита с содержанием технического углерода 5 и 30 мас. % соответственно. Исходя из полученных снимков, можно сказать, что распределение частиц в матрице композита с увеличением содержания наполнителя способствует более плотной укладке агрегатов, и более тесному контакту между ними [23], благодаря которому создаются условия для образования электропроводящих цепей. Необходимо определенное наполнение композита наполнителем, как видно на рис. 3, порог перколяции достигается при содержании технического углерода в количестве 10 мас. % а при концентрации 30 мас. % достигает наибольшего значения электропроводности.

На рис. 5 представлены СЭМ снимки композитов с содержанием 30 мас.% графита и активированного угля. Морфология первого имеет шероховатую структуру, с выходом пластин на поверхность, у второго композита можно наблюдать более крупные частицы, фактически не покрытые связующим, которые выходят на поверхность полимера. Композит наполненный техническим углеродом с содержанием 30 мас.% на рис. 5 с, имеет более гладкую поверхность при одинаковом содержании наполнителя, предположительно за счет более мелких частиц, которые расположены внутри матрицы, вытесняющие полимерное связующее.

На рис. 6 представлены механические свойства композитов, наполненных техническим углеродом. Условная прочность при разрыве составила 0,78 МПа при добавлении 5% ТУ и снижалась при дальнейшем добавлении ТУ вплоть до 0,47 МПа при добавлении 30 мас.%.

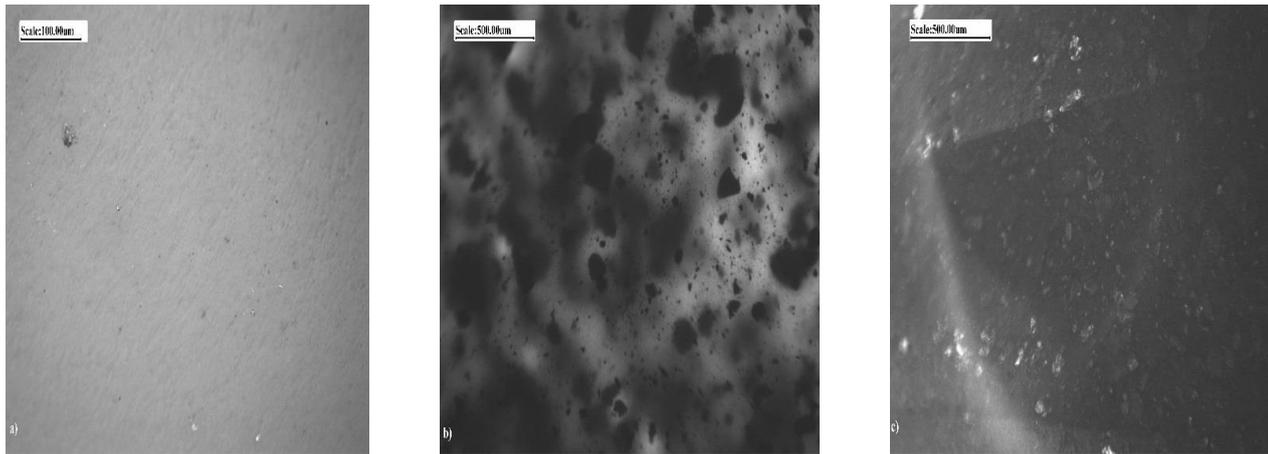


Рис. 4. Микроснимки образцов: а – отвержденный герметик без наполнителя; б – композит с содержанием технического углерода 5 мас. %; с – композит с содержанием технического углерода 30 мас. %.

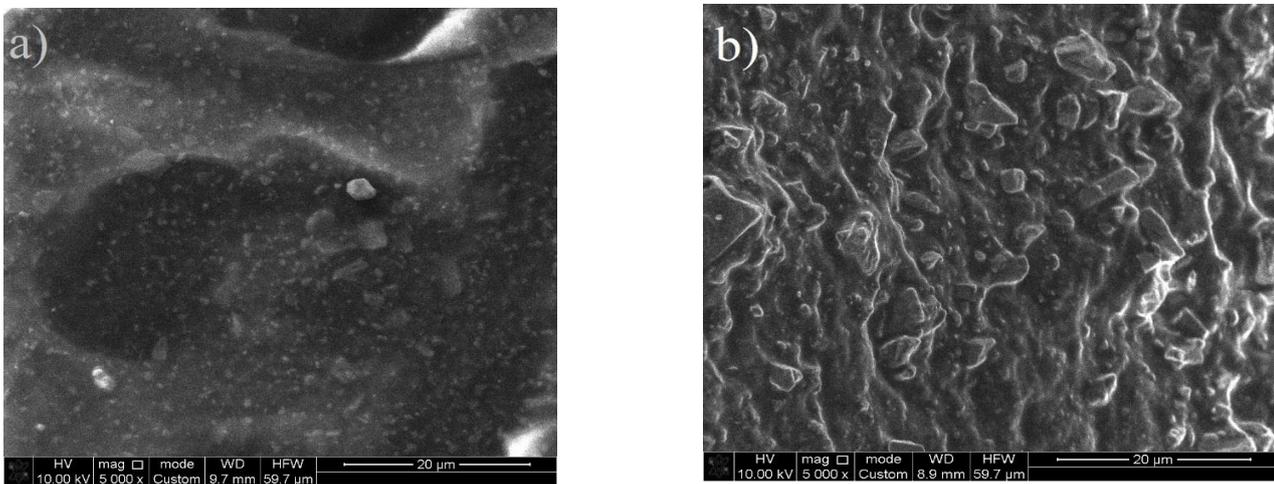


Рис. 5. Микроснимки образцов: а) композит с содержанием графита 30 мас. %; б) композит с содержанием активированного угля 30 мас. %.

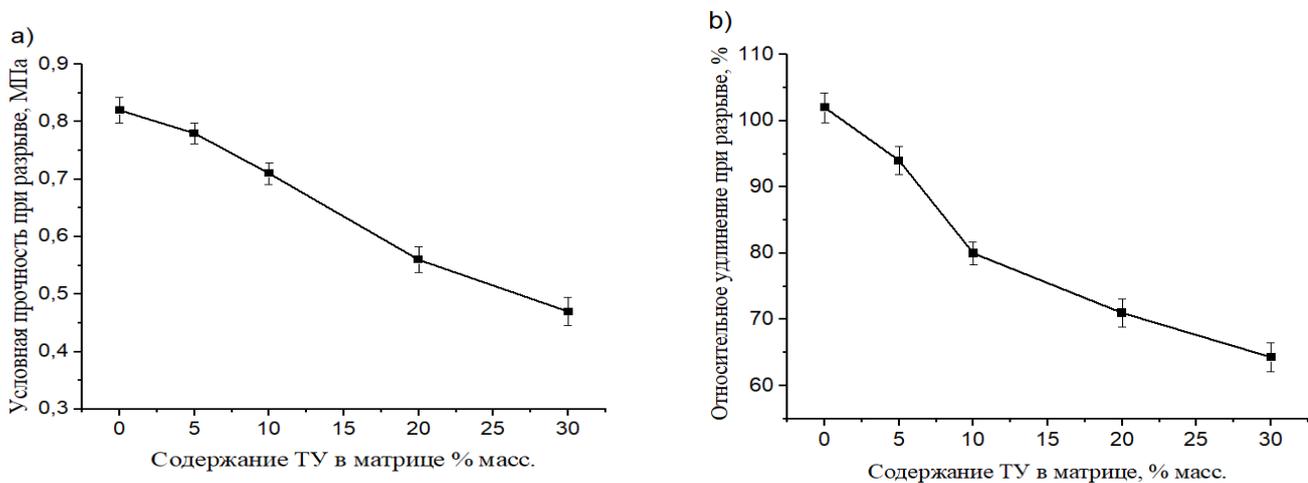


Рис. 6. Механические свойства композитов: 1 – относительное удлинение при разрыве, %; 2 – условная прочность при разрыве, МПа.

Чем большее количество ТУ использовалось, тем хуже становились физико-механические свойства. Удлинение при разрыве чистой матрицы составило 102%, для проводящих композитов при добавлении ТУ также наблюдалось уменьшение до 63% при содержании ТУ 20 мас. %.

#### 4. Заключение

Из анализа экспериментальных данных следует, что на электропроводность композиционных электропроводящих полимеров имеют влияние природа и содержание наполнителя. Также на электропроводность композитов влияют распределение и размеры частиц в матрице, более равномерное распределение позволяет избежать локальных перегревов, способствует образованию контактов.

Проведенные эксперименты продемонстрировали, что самое высокое значение электропроводности имеет герметизирующий композит, содержащий 30 мас. % технического углерода  $1,11 \times 10^2$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Технический углерод имеет наиболее низкие значения удельного сопротивления, за счет высокой адсорбционной поверхности и малых размеров частиц. Однако увеличение содержания технического углерода в матрице отрицательно сказалось на физико-механических свойствах условная прочность при разрыве уменьшилась на 42%, относительное удлинение при разрыве – на 37%. Таким образом, в составе силиконовой матрицы технический углерод может использоваться в качестве электропроводящего наполнителя, но есть необходимость однако требует улучшения физико-механических характеристик.

#### Литература

- [1]. Beaucarne G., Broek K., Chisleac B., Yud Y., Weid J., Zambovac A. Study of compatibility of silicone-based electrically conductive adhesives and conductive backsheets for MWT modules // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol.55. – P.444 – 450.
- [2]. Petrenya R., Toth C., Horvath A., Meszaros L. Development of electrically conductive hybrid composites with a poly(lactic acid) matrix, with enhanced toughness for injection molding, and material extrusion-based additive manufacturing // *Heliyon*. – 2022. – Vol.8. – P.E10287.
- [3]. Wang L., Shen A., Wang W., Yang J., He Z., Zhijie

- T. Graphene/nickel/carbon fiber composite conductive asphalt: Optimization, electrical properties and heating performance // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol.17. – P.01402.
- [4]. Li Q., Liu M., Zhong B., Zhang W., Jia Zh., Jia D. Tetramethylammonium hydroxide modified MXene as a functional nanofiller for electrical and thermal conductive rubber composites // *Composites Communications*. – 2022. – Vol.34. – P.101249.
- [5]. Yu Zh., Wang C., Zhang X., Dattatray A., Yongxian P., Shibao Zh. Self-healing performance of lightweight and electrically conductive ethylene-vinyl acetate copolymer/carbon nanotubes composite foam // *Composites Communications*. – 2022. – Vol.29. – P.101051.
- [6]. Shang S., Gan L., Chun-wah Yuen M., Jiang Sh., Mei Luo N. Carbon nanotubes based high temperature vulcanized silicone rubber nanocomposite with excellent elasticity and electrical properties // *Composites: Part A*. – 2014. – Vol.66. – P.135–141.
- [7]. Yang H., Yao X., Yuan L., Gong L., Liu Y. Strain-sensitive electrical conductivity of carbon nanotube-graphene-filled rubber composites under cyclic loading // *Nanoscale*. – 2019. – Vol.11. – P.578–86.
- [8]. Lin Y., Liu S., Chen S., Wei Y., Dong X., Liu L. A highly stretchable and sensitive strain sensor based on graphene-elastomer composites with a novel double interconnected network // *J Mater Chem C*. – 2016. – Vol.4. – P.6345–52.
- [9]. Kumar V., Lee G., Singh K., Choi J., Lee D. Structure-property relationship in silicone rubber nanocomposites reinforced with carbon nanomaterials for sensors and actuators // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2020. – Vol.303. – P.111712.
- [10]. Шашкеев К.А., Нагорная В.С., Волков И.А., Кондрашов С.В., Дьячкова Т.П., Кондаков А.И. Супергидрофобные электропроводящие покрытия на основе силиконовой матрицы и углеродных нанотрубок // *Журнал прикладной химии*. – 2017. – Т.90, №7. – С.896-906.
- [11]. Столяров Р.А., Меметова А.Е., Ягубов В.С., Ткачев А.Г., Меметов Н.Р. Токопроводящие кремнийорганические материалы и покрытия с многослойными углеродными нанотрубками // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2022. – Т.28, №1. – С.153-161.
- [12]. Burmistrov I., Gorshkov N., Ilinykh I., Muratov D., Kolesnikov E., Anshin S. Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT // *Composites Science and Technology*. – 2016. – Vol.129. – P.79-85.

- [13]. Song P., Song J., Zhang Y. Stretchable conductor based on carbon nanotube/carbon black silicone rubber nanocomposites with highly mechanical, electrical properties and strain sensitivity // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – Vol.191. – P.107979.
- [14]. Галашина Н.М., Недорезова П.М., Шевченко В.Г., Цветкова В.И., Клямкина А.Н., Чмутин И.А. Особенности свойств полимеризационно наполненных электро- и теплопроводящих композиций полипропилен-графит // *Высокомолекулярные соединения*. – 1993. – Т.35, №8. – С.1315-1319.
- [15]. Щегольков А.В., Ягубов В.С. Тепловыделения наномодифицированного композита на основе силикона с бинарным наполнителем унт-графит // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2020. – Т.18, №1. – С.40-48.
- [16]. Зюзин А.М., Карпеев А.А., Янцен Н.В., Наумкин В.В. Влияние содержания технического углерода на фазовый состав и электропроводность полимерного композита // *Письма в ЖТФ*. – 2020. – Т.46, №24.
- [17]. Степашкина А.С., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Алешин А.Н. Письма в Моделирование электропроводности композитных материалов, полученных на основе полипропилена и технического углерода // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т.41, №2.
- [18]. Овсянников Н.Я., Корнев А.Е. Создание электропроводных резин с использованием смесевых композиций технического углерода // *Вестник МИТХТ*. – 2007. – Т.2, №4. – С.52.
- [19]. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции – М.: Химия, 1984. – 240 с.
- [20]. ASTM D 3849-04. Test Method for Carbon Black: Morphological Characterization of Carbon Black Using Electron Microscopy // *Book of Standards*. – 2007. – Vol.9.
- [21]. Bansal R.C. Activated carbon Adsorption. Boca Raton: Taylor and Francis Group, CRC Press, 2005. – 520 p.
- [22]. Глазырин А.Б., Абдуллин М.И., Басыров А.А., Колтаев Н.В., Кокшарова Ю.А. Электропроводящие полимерные материалы для 3D-печати. *Вестник Башкирского университета*. – 2016. – Т.21, №1.
- [23]. El-Tantawy F., Kamada K., Ohnabe H. In situ network structure, electrical and thermal properties of conductive epoxy resin-carbon black composites for electrical heater applications // *Materials Letters*. – 2002. – Vol.56 – P.112-126.

## References

- [1]. Beaucarne G, Broek K, Chisleac B, Yud Y, Weid J, Zambovac A (2014) *Energy Procedia*. 55:444 – 450.
- [2]. Petrenya R, Toth C, Horvath A, Meszaros L (2022) *Heliyon*. 8:E10287.
- [3]. Wang L, Shen A, Wang W, Yang J, He Z, Zhijie T (2022) *Case Studies in Construction Materials*. 17:01402.
- [4]. Li Q, Liu M, Zhong B, Zhang W, Jia Zh, Jia D (2022) *Composites Communications*. 34:101249.
- [5]. Yu Zh, Wang C, Zhang X, Dattatray A, Yongxian P, Shibao Zh (2022) *Composites Communications*. 29:101051.
- [6]. Shang S, Gan L, Chun-wah Yuen M, Jiang Sh, Mei Luo N (2014) *Composites: Part A*. 66:135–141.
- [7]. Yang H, Yao X, Yuan L, Gong L, Liu Y (2019) *Nanoscale*. 11:578-86.
- [8]. Lin Y, Liu S, Chen S, Wei Y, Dong X, Liu L (2016) *J Mater Chem C*. 4:6345-52.
- [9]. Kumar V, Lee G, Singh K, Choi J, Lee D (2020) *Sensors and Actuators A: Physical*. 303:111712.
- [10]. Shashkeev KA, Nagornaya VS, Volkov IA, Kondrashov SV, Dyachkova TP, Kondakov AI (2017) *Journal of Applied Chemistry [Zhurnal prikladnoj himii]* 90(7):896-906. (in Russian)
- [11]. Stolyarov RA, Memetova AE, Yakubov VS, Tkachev AG, Memetov NR (2022) *Bulletin of the Tambov State Technical University [Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]* 28(1):153-161. (in Russian)
- [12]. Burmistrov I, Gorshkov N, Ilinykh I, Muratov D, Kolesnikov E, Anshin S (2016) *Composites Science and Technology* 129:79-85.
- [13]. Song P, Song J, Zhang Y (2020) *Composites Part B: Engineering* 191:107979.
- [14]. Galashina NM, Nedorezova PM, Shevchenko VG, Tsvetkova VI, Klyamkina AN, Chmutin IA (1993) *High-molecular compounds [Vysokomolekulyarnye soedineniya]* 35(8):1315-1319. (in Russian)
- [15]. Shchegolkov A.V., Yakubov V.S. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov [Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova]* 18(1):40-48. (in Russian)
- [16]. Zyuzin AM, Karpeev AA, Yanzen NV, Naumkin VV (2020) *Letters to the Housing Department [Pis'ma v ZHTF]* 46:24. (in Russian)
- [17]. Stepashkina AS, Tsobkallo ES, Moskalyuk OA, Aleshin AN (2015) *Letters to the Housing Department [Pis'ma v ZHTF]* 41:2. (in Russian)
- [18]. Ovsyannikov NYa, Kornev AE (2007) *Vestnik MITKHT [Vestnik MITHT]* 2(4):52. (in Russian)
- [19]. Gul VE, Shenfil LZ (1984) *Electrically conductive polymer compositions [Elektroprovodyashchie polimernye kompozicii]* *Chemistry, Moscow*,

- USSR. (in Russian)
- [20]. ASTM D 3849-04 (2007) Test Method for Carbon Black: Morphological Characterization of Carbon Black Using Electron Microscopy. Book of Standards. 9.
- [21]. Bansal RC (2005) Activated carbon Adsorption. Boca Raton: Taylor and Francis Group, CRC Press.
- [22]. Glazyrin AB, Abdullin MI, Basyrov AA, Koldaev NV, Koksharova YuA (2016) Bulletin of Bashkir University [Vestnik Bashkirskogo universiteta] 21:1. (in Russian)
- [23]. El-Tantawy F, Kamada K, Ohnabe H (2002) Materials Letters. 56:112-126.

### Electrically conductive sealing silicone compositions filled with carbon materials

M.I. Tulepov<sup>1</sup>, J.K. Myshyrova<sup>1</sup>, R. Busquets<sup>2</sup>, S. Azat<sup>1</sup>, L. Sadykova<sup>1</sup>, G.O. Tureshova<sup>1</sup>, B.U. Rakhimova<sup>1</sup>, A.O. Zhapekova<sup>1</sup>, G.A. Spanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kingston University, 55-59 Penrhyn Road, Kingston, United Kingdom

#### Abstract

Electrically conductive sealants and coatings have been of great interest in recent years due to the development of electronics and technology. A lot of research is being conducted in this field to study the electrically conductive properties of composites filled with various carbon materials. However, there are not many studies where siloxanes are used as matrices. The purpose of this work was to obtain an inexpensive electrically conductive composite using a silicone matrix and carbon fillers: carbon black, graphite, coal. The best filler for an electrically conductive sealant was carbon black (30 wt.%) demonstrated electrical conductivity of  $1.11 \times 10^2 \text{ (Ohm} \times \text{m)}^{-1}$ . However, an increase in the carbon black content in the matrix negatively affected the physical and mechanical properties, the conditional tensile strength decreased by 42%, the elongation at break by 37%. The resulting composite can be used as an electrically conductive sealing material, however, if necessary, improvements in physical and mechanical characteristics are preserved.

Keywords: sealing materials, carbon materials, siloxanes, resistivity, carbon black.

### Көміртекті материалдармен толтырылған электр өткізгіш тығыздағыш силикон композициялары

М.И. Тулепов<sup>1</sup>, Ж.К. Мышырова<sup>1</sup>, Р. Бускетс<sup>2</sup>, С. Азат<sup>1</sup>, Л. Сасыгова<sup>1</sup>, Г.О. Турешова<sup>1</sup>, Б.У. Рахимова<sup>1</sup>, А.О. Жапекова<sup>1</sup>, Г.А. Спанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қазақ ұлттық университеті. әл-Фараби, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Кингстон университеті, Пенрин жолы 55-59, Кингстон, Ұлыбритания

#### Аңдатпа

Электр өткізгіш тығыздағыштар мен жабындар соңғы жылдары электроника мен технологияның дамуына байланысты үлкен қызығушылық тудырды. Бұл салада әртүрлі көміртекті материалдармен толтырылған Композиттердің электр өткізгіштік қасиеттерін зерттеу бойынша көптеген зерттеулер жүргізілуде. Алайда силиксандарды матрица ретінде қолданатын көптеген зерттеулер жоқ. Бұл жұмыстың мақсаты силикон матрицасы мен көміртекті толтырғыштарды: техникалық көміртекті, графитті, көмірді қолдана отырып, арзан электр өткізгіш Композит алу болды. Электр өткізгіш тығыздағышқа арналған ең жақсы толтырғыш көміртегі (30 мас. %) болды.  $1,11 \times 10^2 \text{ (OM} \times \text{M)}^{-1}$  электр өткізгіштігін көрсетті. Алайда, матрицадағы техникалық көміртегі мөлшерінің артуы физика-механикалық қасиеттерге теріс әсер етті, шартты үзілу күші 42%-ға, ал үзіліс кезінде салыстырмалы ұзарту 37%-ға төмендеді. Алынған композитті электр өткізгіш тығыздағыш материал ретінде пайдалануға болады, бірақ қажет болған жағдайда физика-механикалық өнімділікті жақсарту сақталады.

*Кілт сөздер:* тығыздағыш материалдар, көміртекті материалдар, силиксандар, меншікті қарсылық, көміртекті техникалық.