

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

Научная статья

УДК 622.276; DOI: 10.61260/2304-0130-2024-4-7-17

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ ЗАЩИТЫ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ

✉ Кузьмина Татьяна Анатольевна;

Лобова Софья Федоровна;

Маер Олег Михайлович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ kuzmina@igps.ru

Аннотация. Сформулированы требования к защитным материалам, способным уменьшить вероятность ложных срабатываний систем пожарной сигнализации вследствие внешних механических и электромагнитных воздействий при сохранении основных тактико-технических характеристик. Проанализированы стратегии создания самовосстанавливающихся полимерных теплопроводящих композитов. Показаны результаты исследования механических свойств полиимидных пленок при растяжении, а также графики эффективности процесса самовосстановления теплопроводящих свойств полимеров на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированных графеном в направлении вдоль и поперек полимерной матрицы после 10 циклов механического воздействия. Сделан вывод о возможности использования такой пленки в качестве перспективного защитного материала при монтаже многоточечных пожарных извещателей.

Ключевые слова: многоточечные пожарные извещатели, полиимидная пленка, графен, полимерная матрица

Для цитирования: Кузьмина Т.А., Лобова С.Ф., Маер О.М. Использование теплоэлектропроводящих полиимидных пленок для защиты многоточечных пожарных извещателей // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2024. № 4. С. 7–17. DOI: 10.61260/2304-0130-2024-4-7-17.

Введение

Пожарные извещатели входят в состав любой пожарной сигнализации и являются техническими средствами, которые передают извещение о пожаре на приемно-контрольный прибор.

Обеспечению пожарной безопасности современных промышленных объектов способствует наличие систем пожарной сигнализации, в которых широко используются линейные и многоточечные тепловые пожарные извещатели. Подобные системы позволяют обнаружить признаки пожара на ранней стадии его возникновения в производственных помещениях большой площади, которые к тому же могут иметь сложную конфигурацию [1, 2]. Эффективность работы многоточечных пожарных извещателей (МТИ) близка к эффективности линейных, однако конструкция соответствующих чувствительных элементов (ЧЭ) позволяет их размещать в труднодоступных локациях производственных помещений, что расширяет их сферу использования по сравнению с линейными пожарными извещателями [3].

Внешний вид теплового сенсора, используемого в многоточечных системах, представлен на рис. 1.

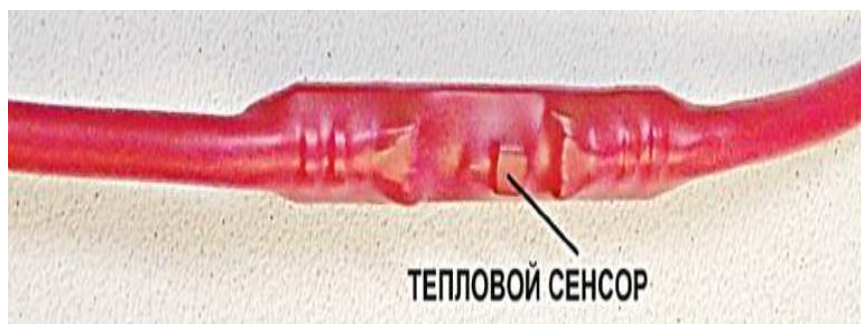


Рис. 1. Внешний вид ЧЭ теплового извещателя, защищенного полиимидной пленкой

Для формирования многоточечной системы отдельные ЧЭ соединяются специальными коммуникационными линиями, так называемыми «кабельными хвостами» (рис. 2), которые также нуждаются в защите.

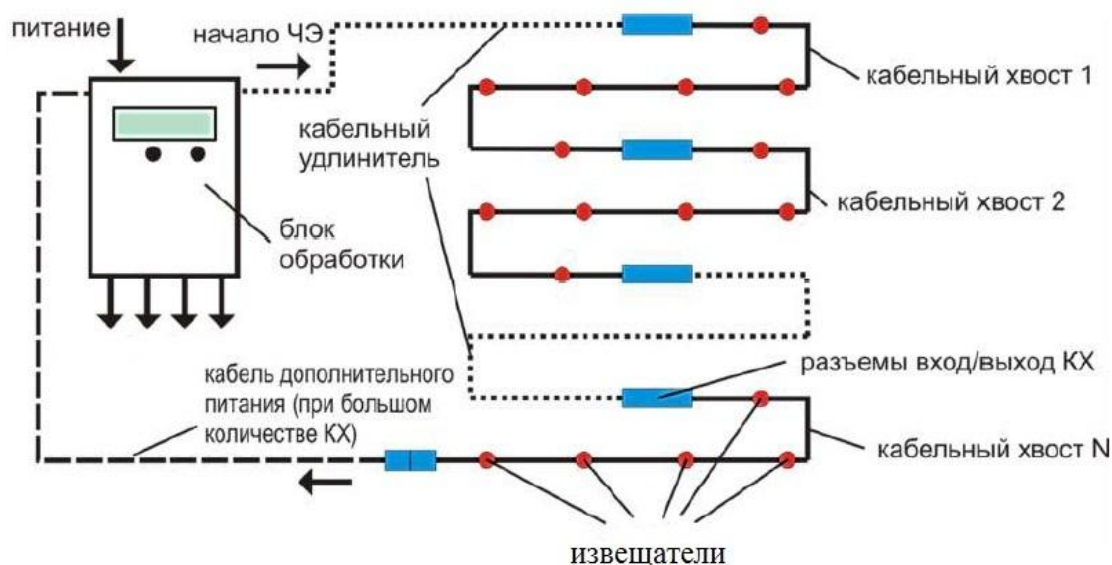


Рис. 2. Соединение составных частей МТИ

От пожарных извещателей требуется высокая устойчивость к электромагнитным и механическим воздействиям. Технологические помехи не должны вызывать ложные срабатывания этих устройств. Существуют также проблемы, связанные с загрязнением наружной поверхности извещателей [4].

Именно поэтому существует необходимость в поиске новых защитных материалов, способных уменьшить вероятность ложных срабатываний систем пожарной сигнализации вследствие внешних механических и электромагнитных воздействий при сохранении основных тактико-технических характеристик. Для этого такие материалы должны:

- обладать необходимыми прочностными характеристиками, позволяющими их многократно использовать как для монтажа шлейфов МТИ, так и для их механической защиты;
- сохранять достаточную теплопроводность, не ухудшающую характеристики ЧЭ МТИ;
- иметь электропроводящие свойства, дающие возможность использования такого материала для экранирования шлейфов МТИ от внешнего электромагнитного воздействия оборудования промышленного объекта [5].

Таковыми материалами могут стать полиимидные пленки, обладающие необходимой механической прочностью, высокими тепло- и электропроводящими свойствами, а если они будут обладать способностью к самовосстановлению возможных повреждений, то срок службы МТИ может быть увеличен [6].

Эффективной стратегией создания самовосстанавливающихся полимерных теплопроводящих композитов является введение в состав наполнителей самовосстанавливающейся полимерной матрицы. Оптимизация молекулярных сшивок и динамического обратимого супермолекулярного взаимодействия (π - π укладка, Н-связи и металл-лиганд) считается перспективным направлением в совершенствовании технологии создания самовосстанавливающихся полимеров [7, 8].

Организация Н-связей в дополнение к обратимым взаимодействиям с сильными поперечными сшивками представляется эффективной технологией создания новых полимеров с высокой прочностью и способностью к быстрому самовосстановлению. В этом смысле графен обладает высокой прочностью, теплопроводностью и электропроводностью, а наполнители на основе графена широко используются для армирования полимеров при получении функциональных композитов. В работе [9] предложен полимер на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, блокированного виниловым концом в качестве матрицы, и графеновой пленки в качестве проводящего слоя или каркаса при высоком разряжении.

Таким образом, возникает задача в оценке стабильности сохранения механических и теплопроводящих свойств полиимидных пленок в условиях проведения монтажных работ и последующей эксплуатации многоточечных пожарных извещателей.

Методы исследования

В процессе синтеза полимера к смеси оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана в различных молярных соотношениях (1:1, 1:2, 1:3, 3:1 и 2:1) добавлялось 20 мл диметилацетамида с последующим перемешиванием при температуре 25 °С в течение 2 ч. Затем добавляли 0,1 ммоль, 16,41 мг 2-метилпропионитрила и выдерживали реакцию при температуре 67 °С в течение суток в среде аргона. Продукт реакции осаждали в деионизированной воде, а белый осадок растворяли в этилацетате. Полученный раствор заливали в форму из политетрафторэтилена, сушили при стандартной температуре 25 °С в продолжении 12 ч, а далее сушили при 60 °С в течение суток для получения образца [10].

Графеновая пленка была прикреплена к термоусадочному листу толщиной 0,3 мм, который содержал клей с одной стороны, и лист был подвергнут усадке путем равномерного нагрева с краев с помощью тепловой пушки при температуре 150 °С (соотношение усадки 1:5). Затем материал погружали в безводный этанол на 12 ч. Материал отделяли от матрицы для получения пленки, которую замачивали в смеси оксиэтилового эфира, полидиметилсилоксана и этилацетата, сушили при температуре 25 °С в течение 12 ч, а потом сушили в вакууме в течение суток. Этот процесс повторялся до тех пор, пока графеновая пленка полностью не закрыла наружную поверхность композита [11].

Механические свойства полиимидных пленок, армированных графеновыми наполнителями, были исследованы с использованием универсальной испытательной машины Electron XQ-46L. Размеры образцов составляли 35,0×12,8×0,25 мм³, скорость растяжения составляла 5 мм/мин. Образцы были нагружены (сжатие 0÷50 %), разгружены и перенагружены 100 раз.

Электрические характеристики образцов исследовались с помощью измерительного комплекса LCR TH2830. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности цилиндрических образцов (диаметр 10 мм, толщина 3 мм) были измерены на установке Xiangtan Xiangke DRL-2A.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 показаны результаты исследования механических свойств полиимидных пленок при растяжении (соотношения оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана $x = 1:0, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 2:3, 1:3$ и температуре 25 °С).

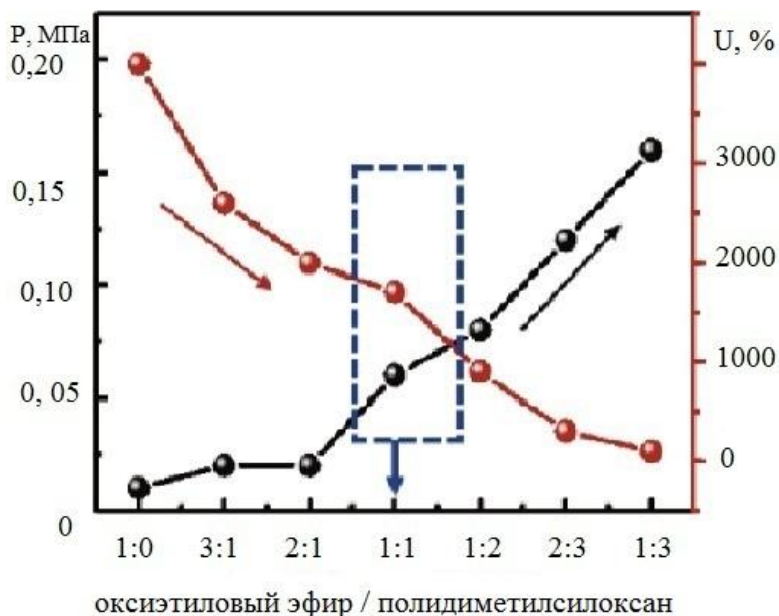


Рис. 3. Прочность (P) и относительное удлинение (U) полиимидных пленок при различных пропорциях оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана

Полиимидная пленка показала достаточно высокую прочность на растяжение ($0,06 \pm 0,01$ МПа) и относительное удлинение (1 800 %), однако предел прочности при растяжении неармированной пленки был ниже, чем у армированных полиимидных пленок при молярных соотношениях оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана $x = 1:2, 2:3$ и $1:3$.

Относительное удлинение неармированной полиимидной пленки оказалось больше, чем у армированных пленок ($x = 1:0, 3:1, 2:1$). Эти результаты показали, что армирование полимерной структуры графеновым наполнителем повышает ее прочность по сравнению с прочностью, достигаемой формированием структуры полиимидной пленки на основе Н-связей.

Неармированная полиимидная пленка проявляла возрастающую эффективность самовосстановления по мере повышения температуры. Эффективность восстановления была одинаковой при комнатной температуре и 40°C (рис. 4).

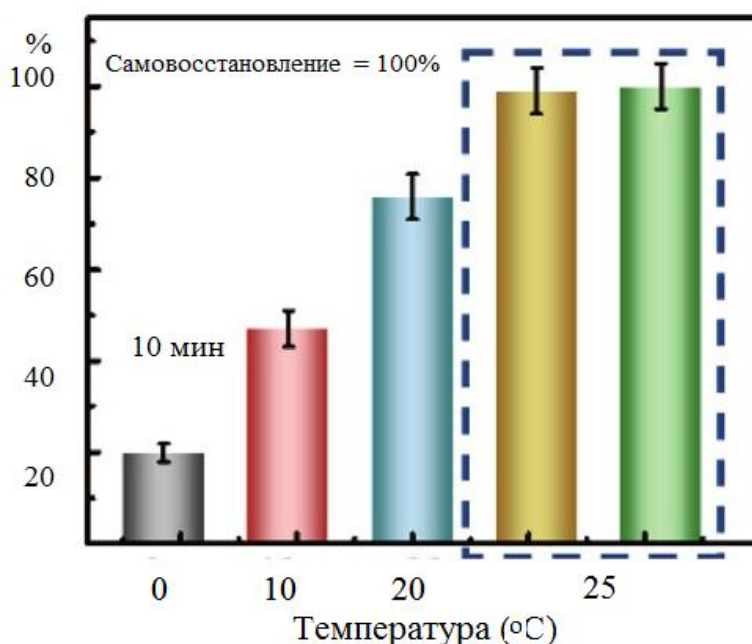


Рис. 4. Эффективность самовосстановления неармированной полиимидной пленки

Эксперимент показал, что оптимальным условием для быстрого самовосстановления неармированной полиимидной пленки является ее нагрев при температуре 25 °С в течение 10 мин.

Для эластомеров на основе армированных полиимидных композитов их механические характеристики ухудшались после необратимого повреждения или разрушения при изгибе или концентрации межфазных напряжений в реальных условиях работы многоточечных пожарных извещателей. На самовосстанавливающиеся свойства композитов также влияют химическая активность и движение цепочек полимерных сегментов [11]. По сравнению с самовосстановлением электро- и теплопроводящих свойств самовосстановление механических характеристик армированных полиимидных композитов является более сложным процессом.

Относительное удлинение собственно графеновой пленки составило 320 %, а предел прочности при растяжении и относительное удлинение армированных полиимидных композитов составили $2,23 \pm 0,15$ МПа и 270 % соответственно.

Ширина и толщина образца армированного полиимидного композита составляли 10,0 и 3 мм соответственно. На рис. 5 показана зависимость прочности на растяжение исследуемого образца с односторонним повреждением в виде разреза или без него (ширина разреза 1,0 мм) – испытывали со скоростью 5 мм/мин.

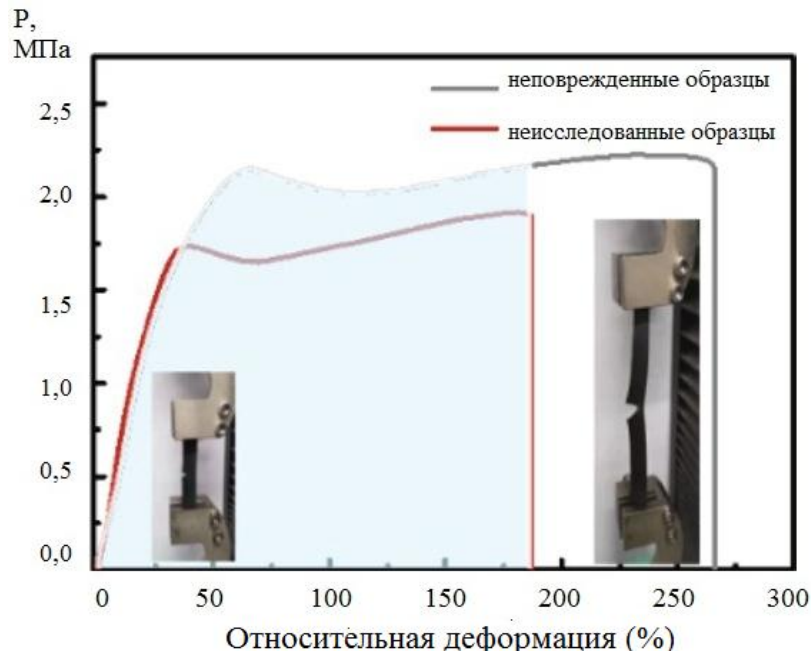


Рис. 5. Графические зависимости напряжения от деформации для неповрежденных и поврежденных образцов

Чтобы количественно оценить способность к самовосстановлению армированных полиимидных композитов, лист разрезали на две части и выдерживали при стандартной температуре 25 °С в продолжении $0 \div 2$ ч. Как показано на рис. 6, предел прочности при растяжении у такой пленки восстановился до $0,75 \pm 0,1$ МПа, а напряжение составило 34,09 % после самовосстановления в течение 10 мин. Пленка, которая релаксировала в течение часа, могла растягиваться более чем на 170 % и показывала предел прочности при растяжении $1,5 \pm 0,2$ МПа при относительной деформации 68,18 %.

Когда время самовосстановления составляло 2 ч, эффективность заживления повреждений на поверхности армированных полиимидных композитов была аналогична таковой в исходном состоянии, и механические свойства материала были эффективно восстановлены.

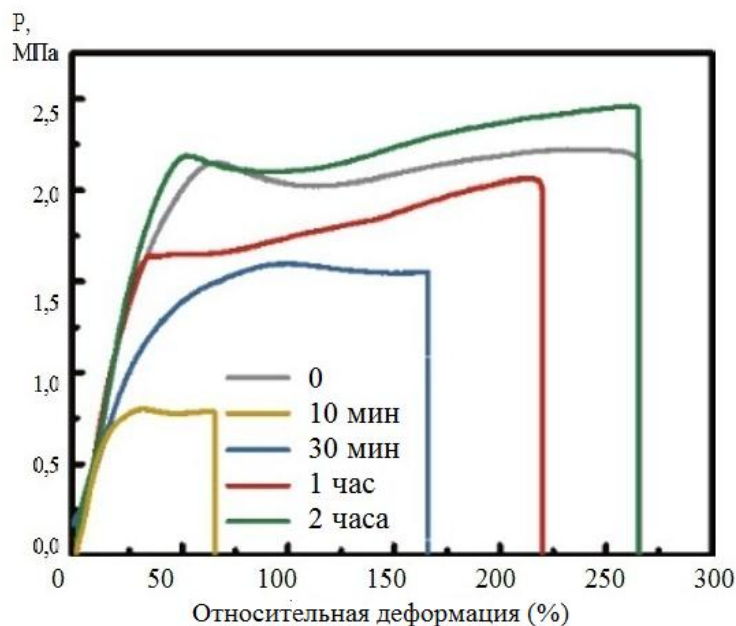


Рис. 6. Зависимости напряжение-деформация для различной продолжительности релаксации при температуре 25 °C

Более того, значения относительной деформации для армированных полиимидных композитов составляли $30,5 \pm 1,50$ %, $56,81 \pm 2,2$ %, $79,52 \pm 2,50$ % и 100 % при температурах заживления 0, 10, 20 и 25 °C соответственно (рис. 7).

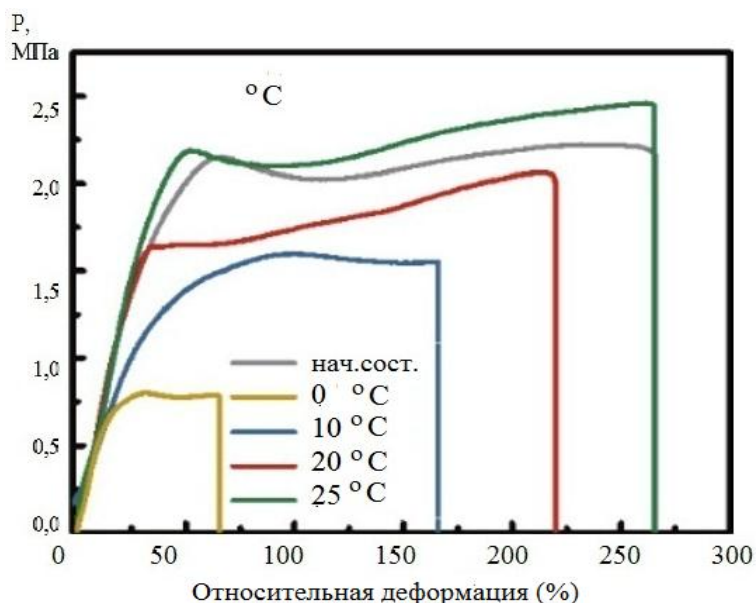


Рис. 7. Зависимости напряжение-деформация для различных температур при продолжительности релаксации 2 ч

К основным факторам, влияющим на теплопроводящие свойства полимеров на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированного графеном, относятся, прежде всего, плотность и наличие межфазного теплового сопротивления. Что касается плотности, то графеновые материалы имеют значительные пустоты при незначительной плотности, что увеличивает их термическое сопротивление. По мере заполнения этих пустот полимером плотность образующегося композита увеличивается, что приводит к более высокой теплопроводности синтезированного материала.

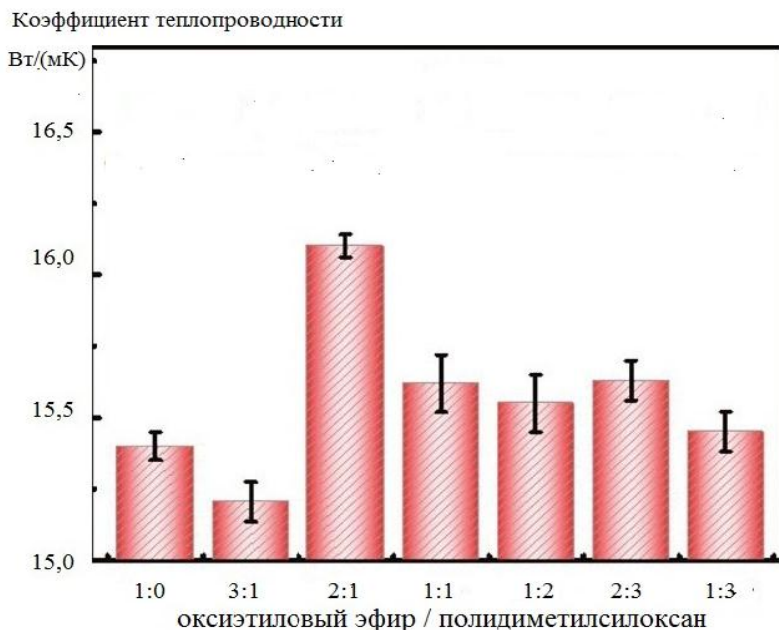


Рис. 8. Коэффициент теплопроводности L-армированной полиимидной пленки вдоль полимерной матрицы

Чтобы проверить влияние самовосстановления структуры армированной полиимидной пленки на самовосстановление ее теплопроводящих свойств, была исследована теплопроводность образцов после механических воздействий на них (рис. 8).

Если соотношение между оксиэтиловым эфиром и полидиметилсилоксаном составляет 1:1, армирование полимера графеном способствует сильной адгезии, происходящей на поверхности раздела композита, что может существенно уменьшать величину его термического сопротивления.

Рис. 9 иллюстрирует эффективность процесса самовосстановления теплопроводящих свойств полимеров на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированных графеном, в направлении вдоль полимерной матрицы после 10 циклов механического воздействия.

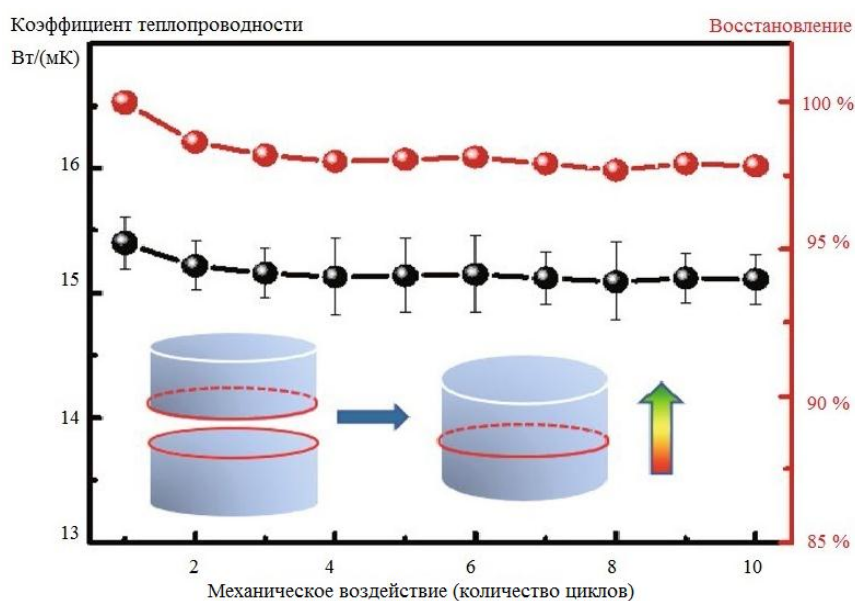


Рис. 9. Самовосстановления теплопроводящих свойств полимеров на торцах образцов после механического воздействия вдоль полимерной матрицы

С увеличением соотношения между оксиэтиловым эфиром и полидиметилсилоксаном теплопроводность материала сначала увеличивалась, а затем уменьшалась. Когда соотношение оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана составляло 1:1, начальная теплопроводность композита была самой высокой, а эффективность самовосстановления его теплопроводящих свойств после первого и десятого циклов механического воздействия составила 98,65 % и 97,83 % соответственно.

Проводимые измерения подтвердили анизотропность теплопроводящих свойств полимеров на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированных графеном. Результаты исследования теплопроводящих свойств образцов в направлении распространения тепла поперек полимерной матрицы представлены на рис. 10, 11.

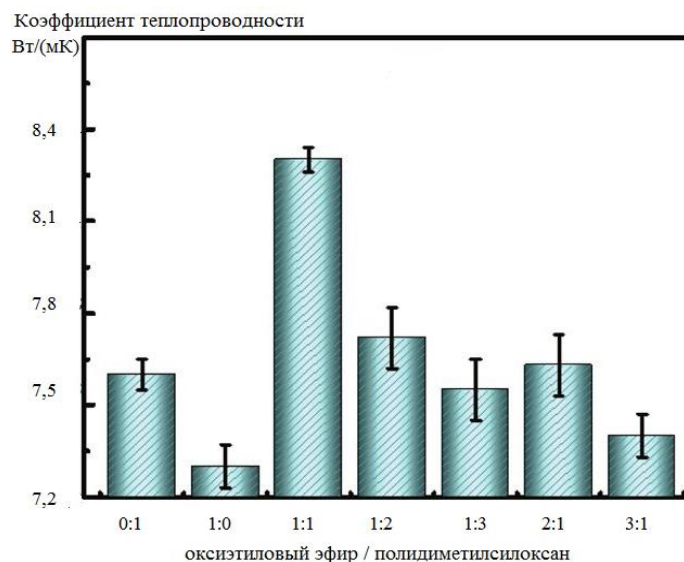


Рис. 10. Коэффициент теплопроводности армированной полиимидной пленки поперек полимерной матрицы

Теплопроводящие свойства в направлении вдоль и поперек полимерной матрицы демонстрировали одинаковую тенденцию зависимости от соотношения оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана: когда оно составляло 1:1, теплопроводящие свойства были максимальны. Для направления поперек полимерной матрицы начальная теплопроводность составляла $8,3 \pm 0,2$ Вт/(м·К), а эффективность самовосстановления теплопроводности достигала 100 % после 10 циклов (рис. 11).

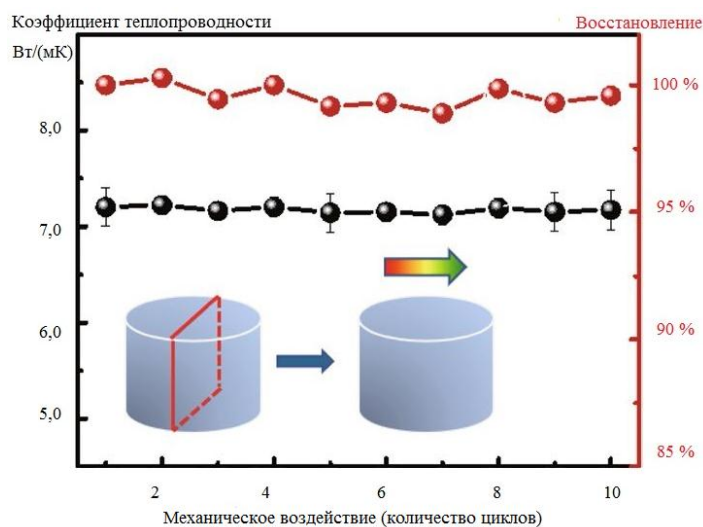


Рис. 11. Самовосстановления теплопроводящих свойств полимеров на боковой поверхности образцов после механического воздействия поперек полимерной матрицы

Электропроводность полимера на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированных графеном, измерялась в процессе механического воздействия на образец. На рис. 12 представлена схема такого эксперимента.



Рис. 12. Установка по измерению электропроводности образца в процессе механического воздействия на него

Результаты измерения электрического сопротивления образцов полимера на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, неармированных и армированных графеном, представлены на рис. 13.

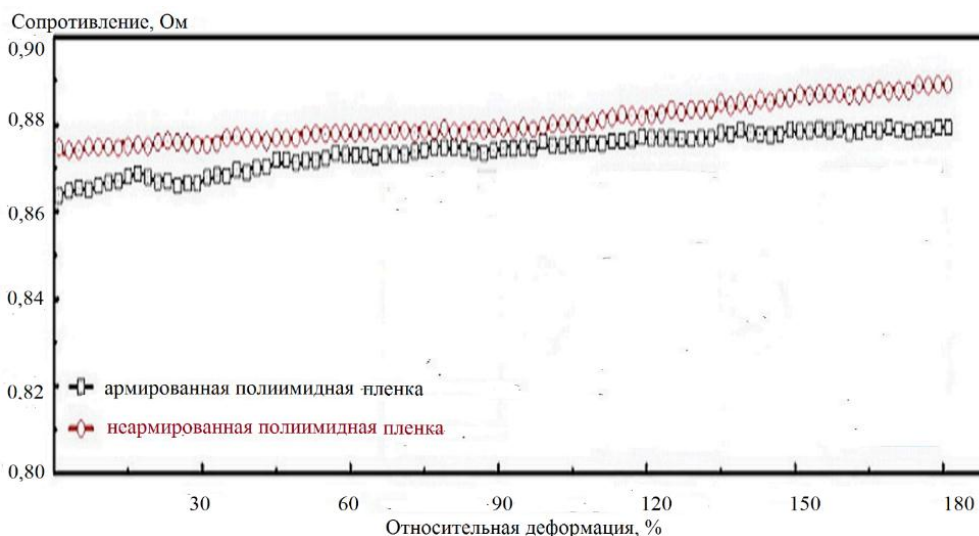


Рис. 13. Электрическое сопротивление полиимидной пленки в условиях деформации

Размеры исследуемых образцов составляли $35,0 \times 10,0 \times 0,25$ мм³. Среднее значение электрического сопротивления армированного образца в состоянии растяжения составило $0,865 \pm 0,005$ Ом, что соответствует удельному сопротивлению $61,8$ Ом·мм²/м и соизмеримо с величиной удельного сопротивления угольных щеток (40 Ом·мм²/м).

Заключение

1. Пленка из полимера на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированного графеном, обладает высокой прочностью на растяжение ($0,06 \pm 0,01$ МПа), которая сохраняется при многократном механическом воздействии и даже незначительных

механических повреждениях (ширина разреза до 1 мм). Это позволяет рассматривать исследуемый полимер в качестве перспективного защитного материала для монтажа многоточечных пожарных извещателей на промышленных объектах.

2. Величина коэффициента теплопроводности исследуемой полимерной пленки вдоль и поперек полимерной матрицы составляла $13 \pm 0,2$ и $8,3 \pm 0,2$ Вт/(м·К) соответственно, что соизмеримо с теплопроводностью некоторых металлических сплавов и значительно превышает теплопроводящие свойства традиционных материалов, используемых для защиты ЧЭ МТИ.

3. Хотя удельное электрическое сопротивление полимера на основе оксиэтилового эфира и полидиметилсилоксана, армированного графеном ($61,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), значительно меньше такового для традиционных полимерных материалов, эффективность защиты коммуникационных линий пожарной сигнализации от электромагнитных помех такой полимерной пленкой нуждается в дополнительном изучении.

Системы пожарной сигнализации, в которых используются линейные и многоточечные тепловые пожарные извещатели, позволяют обнаружить признаки пожара на ранней стадии его возникновения в производственных помещениях большой площади и сложной конфигурации. Несмотря на то, что эффективность работы многоточечных пожарных извещателей близка к эффективности линейных, конструкция соответствующих чувствительных элементов многоточечных пожарных извещателей позволяет их размещать в труднодоступных локациях производственных помещений, что расширяет сферу использования многоточечных пожарных извещателей по сравнению с линейными.

Список источников

1. Анализ эффективности применения тепловых многоточечных пожарных извещателей / В.Л. Здор [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2004. Т. 13. № 1. С. 30–32.
2. Современные системы раннего обнаружения пожара / М.В. Савин [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. 2003. Т. 12. № 6. С. 70–73.
3. Расчет параметров многоточечных пожарных извещателей суммирующего типа при проектировании / Г.М. Карнаухов [и др.] // Пожарная безопасность. 2005. № 1. С. 106–112.
4. Гон Ха Сон, Кан Кван Су, Ян Чжон Сон. Сравнительно исследование обычных и аналоговых пожарных датчиков с различным числом пожарных извещателей // Международный журнал управления и автоматизации. 2018. № 3. Изд. 9. С. 299–308.
5. Сапронов С.В. Автоматизированный контроль системы охранной сигнализации / Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. трудов 4-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф.: в 3-х т. 2017. С. 283–286.
6. Superior toughness and fast self-healing at room temperature engineered by transparent elastomers / S.M. Kim [et al.] // Adv. Mater. 2018. № 30 (1). P. 1705145. DOI: 10.1002/adma.201705145.
7. Self-healing thermally conductive adhesives / U. Lafont [et al.] // J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2014. № 25 (1). P. 67–74. DOI: 10.1177/1045389X13498314.
8. A self-healing silicone/BN composite with efficient healing property and improved thermal conductivities / L. Zhao [et al.] // Compos. Sci. Technol. 2020. № 186. P. 107919. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.
9. Lightweight, flexible cellulose-derived carbon aerogel@reduced graphene oxide/PDMS composites with outstanding EMI shielding performances and excellent thermal conductivities / P. Song [et al.] // Nano-Micro Lett. 2021. № 13. P. 91. DOI: 10.1007/s40820-021-00624-4.
10. Self-healing and shape-memory properties of polymeric materials cross-linked by hydrogen bonding and metal–ligand interactions / Yu. Kobayashi [et al.] // Polym. Chem. 2019. № 10 (33). P. 4519–4523. DOI: 10.1039/C9PY00450E.
11. Self-healing high strength and thermal conductivity of 3D graphene/PDMS composites by the optimization of multiple molecular interactions / H. Yu [et al.] // Macromolecules. 2020. № 53 (16). P. 7161–7170. DOI: 10.1021/acs.macro.9b02544.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 16.10.2024; принята к публикации: 29.11.2024

Информация об авторах:

Кузьмина Татьяна Анатольевна, доцент кафедры надзорной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kuzmina@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3573-785X>, SPIN-код: 2511-0787

Лобова Софья Федоровна, старший научный сотрудник исследовательского центра экспертизы пожаров научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: sophyf@mail.ru, AuthorID: 601240, SPIN-код: 5123-5511

Маер Олег Михайлович, доцент кафедры надзорной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат экономических наук, e-mail: oleg.maer.84@mail.ru, SPIN-код: 6979-7289