

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Н.М. Кузнецов

Е.П. Банин

А.Е. Крупнин

С.В. Крашенинников

А.Ю. Вдовиченко

С.Н. Чвалун

kyz993@yandex.ru

evg.banin@gmail.com

artkrupnin@gmail.com

derevatograf@yandex.ru

vdartem@yandex.ru

s-chvalun@yandex.ru

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены некоторые аспекты создания новых стимул-чувствительных материалов, обратимо деформируемых под действием электрического поля за счет возникновения давления Максвелла. Для повышения отклика материала на внешний стимул изготовлены полимерные композиты с наполнителями различной природы и формы: порошки железа, монтмориллонита и целлюлозы. Приготовлены композиционные высокоэластические пленки на основе вулканизованных полидиметилсилоксановых каучуков, содержащих 5 % (масс.) наполнителя. Морфология частиц наполнителя изучена методами электронной микроскопии. В результате испытаний на одноосное растяжение определены механические свойства материалов: модуль Юнга и коэффициенты для трехпараметрического упругого потенциала Йо до значения деформации 800 %. Исследованы электрофизические свойства пленок, их отклик на приложение электрического поля при различных значениях напряженности (0,84 и 2,5 кВ/мм). Установлено влияние природы наполнителя на проводимость и диэлектрическую проницаемость композиционных материалов. Данные механических и диэлектрических исследований характерны для композиционных материалов с концентрацией наполнителя ниже порога перколяции. Установлено, что композит с целлюлозой проявляет наибольший отклик на внешний стимул,

Ключевые слова

Стимул-чувствительные материалы, эластомеры, композиты, давление Максвелла, диэлектрическая спектроскопия, гиперупругие материалы, модель Йо

определяемый балансом следующих факторов: модулем Юнга и значениями электрофизических характеристик. Определены направления дальнейших исследований и рассмотрены перспективы создания диэлектрических эластомеров с заданными свойствами

Поступила 27.05.2022

Принята 20.06.2022

© Автор(ы), 2022

Исследование выполнено в рамках Госзадания НИИЦ «Курчатовский институт»

Введение. Диэлектрические эластомеры — перспективные, «умные» материалы, которые способны к большим обратимым деформациям при приложении электрического поля. Подобные материалы могут быть использованы в качестве актуаторов или преобразователей электрической энергии в механическую. В последнее десятилетие наблюдается научный интерес к диэлектрическим эластомерам, который связан с их активным применением в мягкой робототехнике [1–3], в качестве систем очувствления [4, 5], в «умных» биомедицинских устройствах [6, 7]. Основные преимущества диэлектрических эластомеров заключаются в высокой плотности энергии (до 3,4 МДж/м³), быстром отклике на воздействие (порядка миллисекунд), механической податливости. Комбинация этих параметров позволяет получать высокие деформационные характеристики, например, в искусственных мышцах. Под действием электрического поля диэлектрические эластомеры деформируются. Движущей силой такой деформации является давление Максвелла, возникающее за счет электростатической силы между противоположно заряженными электродами. В качестве образцов диэлектрических эластомеров часто используют тонкие пленки [2, 8, 9]. При деформации до 10 % по толщине пленки для расчета деформации применяют соотношение теории упругости:

$$S_z = -\frac{P}{Y} = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{Y},$$

где P — давление Максвелла в пленке; Y — модуль Юнга материала пленки; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); E — напряженность электрического поля, приложенного к образцу.

Согласно приведенному соотношению, диэлектрическая проницаемость, модуль Юнга и напряженность электрического поля напрямую влияют на деформацию пленки. Описаны несколько способов увеличения деформации образцов на основе диэлектрических эластомеров: преднагру-

жение, уменьшение модуля Юнга, увеличение диэлектрической проницаемости, уменьшение толщины пленки, увеличение напряженности поля на единицу площади или длины. Преднагружение образцов позволяет увеличить деформации, но требует дополнительной оснастки в конечном устройстве, поэтому ограничено применимо на практике. Увеличение напряженности электрического поля — наименее предпочтительный способ увеличения деформаций вследствие возрастающей опасности для человека при применении. В связи с этим актуален поиск субкиловольтных диэлектрических эластомеров [10, 11], т. е. эластомеров, которые обладают достаточной способностью к деформированию при напряжении менее 1 кВ. Кроме того, предел рабочих напряженностей электрического поля ограничен напряжением пробоя. Увеличение напряженности электрического поля также ведет к возрастанию объема, занимаемого всей системой. Поэтому наиболее предпочтительными сценариями для поиска материалов можно полагать: уменьшение модуля Юнга, увеличение диэлектрической проницаемости пленки и уменьшение толщины пленки.

В последние годы появились пленки марок VNB 4905 и VNB 4910 компании 3M [12, 13]. Эти марки диэлектрических эластомеров широко используют в исследованиях в качестве образцов сравнения. Среди перспективных материалов следует отметить полидиметилсилоксан (ПДМС), который обладает несколькими преимуществами для биомедицинского применения: относительно малый модуль Юнга, высокий отклик на внешний стимул, высокая температурная стабильность и хорошая биосовместимость [14–16]. Однако ПДМС имеет небольшую относительную диэлектрическую проницаемость, что ограничивает область применения композитов на его основе. Предпринято множество попыток для устранения указанного недостатка эластомеров на основе ПДМС. Одним из наиболее популярных подходов является создание полимер-полимерного или дисперсно-наполненного композита на основе ПДМС в целях увеличения относительной диэлектрической проницаемости материала. Получены стимул-чувствительные композиты ПДМС, наполненные высокополяризованными частицами керамики ниобата магния [17], титаната бария ($BaTiO_3$) [18–20], диоксида титана (TiO_2) [21], титаната кальция и меди [22, 23], металлическими частицами и углеродными наноструктурами (нанотрубки, графен) [24]. Например, в [25] показано, что в результате введения в ПДМС нанопластинок графена можно увеличить деформацию образца по сравнению с чистым ПДМС за счет повышения диэлектрической проницаемости. При этом необходимо учитывать эффект возможно-

го увеличения модуля Юнга. Так рост модуля может нивелировать положительный эффект повышения относительной диэлектрической проницаемости. Поэтому важно сохранять невысокую концентрацию наполнителя в полимерной матрице. Необходимо также учитывать эффект снижения прочности материала на разрыв при добавлении пластификатора [18], а также способность пластификатора испаряться и мигрировать в процессе использования диэлектрического эластомера. Таким образом, при применении наполнителя необходимо стремиться к увеличению относительной диэлектрической проницаемости при неизменности или уменьшении модуля Юнга, иначе добиться значимого увеличения деформаций пленки под действием электрического поля не удастся. Представленный подход обладает следующими недостатками: возможны диэлектрические потери; необходимость оптимизации концентрации наполнителя (высокое содержание частиц может приводить к преждевременной деструкции материала под действием электрического поля). Для устранения представленных недостатков в [26] предложено в качестве наполнителя для ПДМС использовать наногибридный наполнитель полидофамин/диоксид кремния/оксид графита (PDA/SiO₂/GO). Листы оксида графита модифицировали диоксидом кремния с получением сэндвичевых структур с целью уменьшить диэлектрические потери и повысить прочность на пробой. Слой диоксида кремния на поверхности играет роль диэлектрика и нивелирует ток утечки. Наполнитель дополнительно модифицировали полидофамином для улучшения его диспергирования в полимерной матрице. С помощью указанного подхода авторам удалось достигнуть рабочей деформации образца около 14 % при напряженности электрического поля 33,19 кВ/мм без предварительного растяжения при концентрации наполнителя 5 % (масс.). Отметим, что рабочая напряженность электрического поля остается высокой, что неприемлемо для некоторых, например, биомедицинских, применений. Следовательно, задача создания новых стимул-чувствительных материалов и адаптации существующих диэлектрических эластомеров для биомедицинских задач остается актуальной и требует проведения дополнительных исследований.

Материалы и методы. *Получение образцов.* В качестве полимерной матрицы использовали двухкомпонентный формовочный силикон (ПДМС) с катализатором на основе платины *Creative Platinum* (Epoch Master, Россия), отверждаемый при комнатной температуре. В качестве наполнителей выбраны порошок железный ПЖР 3.200.28 (ООО «ППМ Урал Атомизация», Россия), натриевая форма монтмориллонита Cloisite Na⁺ (BYK Additives & Instruments, Германия) и нанопибриллярная целлю-

лоза (Nanografi Nanotechnology AS, Турция). Компоненты силикона и выбранный наполнитель (5 % (масс.)) механически перемешивали в течение 5 мин с последующей дегазацией под вакуумом продолжительностью 5 мин с использованием мембранного насоса MZ 2C NT (Vacuumbrand, Германия). Далее из полученной смеси методом полива получали пленки толщиной 2 мм. Для механических испытаний на одноосное растяжение применяли стандартизованные (ASTM D 638 тип 5) образцы в форме лопаток (выборка по трем образцам для каждого материала), которые вырубали лабораторным прессом из предварительно сформованных пленок с помощью штампа.

Электронная микроскопия. Морфологию частиц наполнителя исследовали методами растровой (РЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии с помощью *Versa 3D DualBeam* (FEI, США) в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 1 кВ и *Titan 80-300* (ThermoFisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 300 кВ соответственно. Перед нанесением образцов для исследований ПЭМ проводили гидрофилизацию поверхности медных сеток с углеродной подложкой *Pelco Pure C* (Ted Pella Inc., США) путем обработки в тлеющем разряде *Pelco EasiGlow* (Ted Pella Inc., США) в течение 30 с при силе тока 25 мА и давлении 0,26 мбар.

Диэлектрическая спектроскопия. Изотермические диэлектрические спектры в интервале частот $10^{-1} \dots 10^6$ Гц получали с использованием анализатора импеданса высокого разрешения *Novocontrol Alpha-A* с системой контроля температуры *Quatro Cryosystem* и измерительной вставкой *ZGS Alpha-A* (Novocontrol Technologies GmbH & Co. KG, Германия). Измерения проводили при температуре 20 °С и напряжении возбуждения $1 V_{RMS}$.

Механические испытания. Исследование зависимости напряжения от деформации при одноосном растяжении проводили на универсальной испытательной машине *Instron® 5965 Series* (Illinois Tool Works Inc, США), укомплектованной датчиком нагрузки ± 5000 Н. Для исключения проскальзывания образцов в процессе испытаний применяли пневматические захваты с насечками. Испытания проводили с постоянной скоростью 500 мм/мин при температуре 20 °С. В диапазоне линейной зависимости напряжения от деформации для каждого материала определяли модуль Юнга. Для описания поведения материалов при больших значениях деформации использовали трехпараметрическую модель Йо (Yeoh), для которой упругий потенциал записывается как [27]:

$$W = \sum_{i=1}^3 C_i (I_1 - 3)^i,$$

где C_i — подлежащие определению константы; $I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}$ — первый инвариант тензора меры деформации Коши — Грина в случае одноосного растяжения, λ — кратность удлинения.

Для определения осредненных констант в модели Йо использовали встроенный в конечно-элементный пакет *ANSYS Workbench* (ANSYS Inc., США) модуль обработки экспериментальных кривых.

Принципиальный отклик материалов на электрическое поле исследовали по изменению нормальной силы реометром *Physica MCR 501* (Anton Paar, Германия) в специальной электрореологической ячейке с геометрией двух параллельных дискообразных плоскостей, изолированной от прибора керамическим вкладышем. Диаметр плоскости (электрода) 50 мм. Расстояние между электродами варьировали в зависимости от толщины образца. Образец помещали в ячейку и зажимали между электродами до появления нормальной силы порядка 1 Н. Электрический потенциал подавали от источника высокого напряжения *HCP 14-12500 MOD* (FuG Elektronik GmbH, Германия), напряженность электрического поля нормировали на расстояние между электродами. Экспериментальные значения напряженности поля 0,84 и 2,5 кВ/мм для всех образцов. Чувствительность к внешнему стимулу определяли по изменению (уменьшению) значения нормального напряжения.

Результаты и их обсуждение. Морфологию наполнителей исследовали методами электронной микроскопии. Типичные микрофотографии частиц наполнителей приведены на рис. 1. Порошок железа (рис. 1, а) представляет собой высокополидисперсные частицы сферической и эллипсоидной формы с сильно шероховатой поверхностью. Размеры частиц варьируются в пределах 1...300 мкм с медианным значением 60 ± 2 мкм.

Монтмориллонит — природный материал, относящийся к классу слоистых алюмосиликатов и обладающий пластинчатой морфологией толщиной ~ 1 нм и характерными размерами 200...500 нм [28]. Индивидуальные частицы склонны к образованию стопок из нескольких десятков слоев, которые, в свою очередь, формируют агломераты тактоидной фазы (рис. 1, б). В жидкой среде стопки могут быть разрушены — эксфолированы до индивидуальных частиц. Возникающие в процессе роста алюмосиликата дефекты изоморфного замещения приводят к появлению избыточного отрицательного заряда на поверхности пластин, который компенсируется обычно ионами щелочных и щелочноземельных металлов. В настоящее

время существуют промышленные способы модификации монтмориллонита для получения стандартизованного наполнителя и повышения степени эксфолиации при формировании полимерных композитов. Ранее проведенные исследования показали хорошую совместимость натриевой формы монтмориллонита с силиконовыми олигомерами, высокую степень эксфолиации, а также повышенные электрофизические характеристики (проводимость, диэлектрическая проницаемость, сила диэлектрической релаксации) по сравнению с другими модификациями этого наполнителя [29].

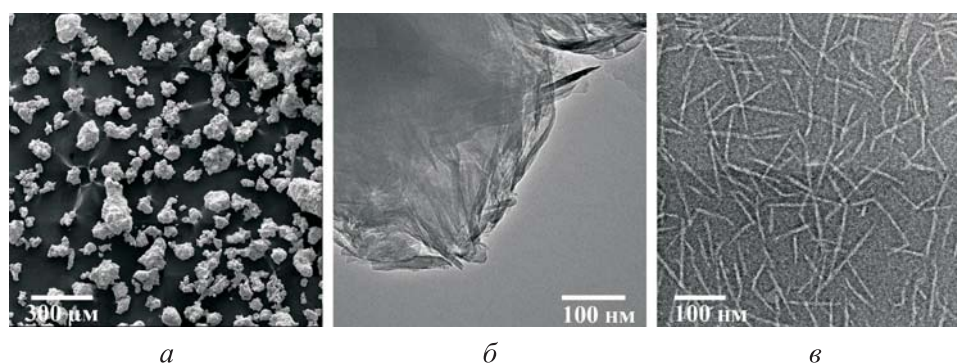


Рис. 1. Микрофотографии частиц наполнителей железа (*а*), монтмориллонита (*б*), наноцеллюлозы (*в*), полученные РЭМ (*а*) и ПЭМ (*б, в*)

Целлюлоза — самый распространенный биополимер на Земле, который можно получить из растительного сырья по низкой себестоимости. Целлюлоза — структурный полисахарид, который в нативном состоянии существует в форме фибрилл, содержащих кристаллические и аморфные домены. Кристаллические области могут быть выделены в виде отдельных частиц — стержнеподобных нанокристаллов, которые применяют в качестве наполнителя при создании полимерных композитов различного назначения, в том числе медицинского [30, 31]. Используемая в представленном исследовании целлюлоза представляет собой высокоанизотропичные стержни с достаточно высокой степенью полидисперсности по длине, но не по диаметру (рис. 1, *в*). Размеры частиц варьируются в пределах 40...180 нм со средним значением 87 ± 33 нм и средним диаметром 6 ± 1 нм.

В работе использованы как микронные, так и наноразмерные типы наполнителей, обладающие различной природой и морфологией. Выбор наполнителей не случаен: металлические частицы обладают высокой проводимостью и, как следствие, высокой поляризуемостью в структуре диэлектрического композиционного материала; монтмориллонит и целлюлоза зарекомендовали себя в качестве эффективной электрочувствительной

добавки [32, 33], а их частицы обладают высоким характеристическим отношением, что увеличивает площадь контакта наполнителя с полимерной матрицей и способствует росту поляризуемости на границе раздела фаз.

Типичные кривые растяжения полученных композиционных материалов показаны на рис. 2, а. Для всех образцов характерно гиперупругое поведение с деформациями, составляющими сотни процентов, что типично для силиконовых эластомеров. Для всех кривых характерен начальный линейный участок, на котором определены значения модуля Юнга (таблица). Изготовленные материалы отличаются по цвету. Фотографии образцов для механических испытаний на одноосное растяжение приведена на рис. 2, б (вставка). Ненаполненные образцы являются прозрачными, при введении наполнителя цвет меняется на черный, желтый и мутно-белый в случае железа, монтмориллонита и целлюлозы соответственно.

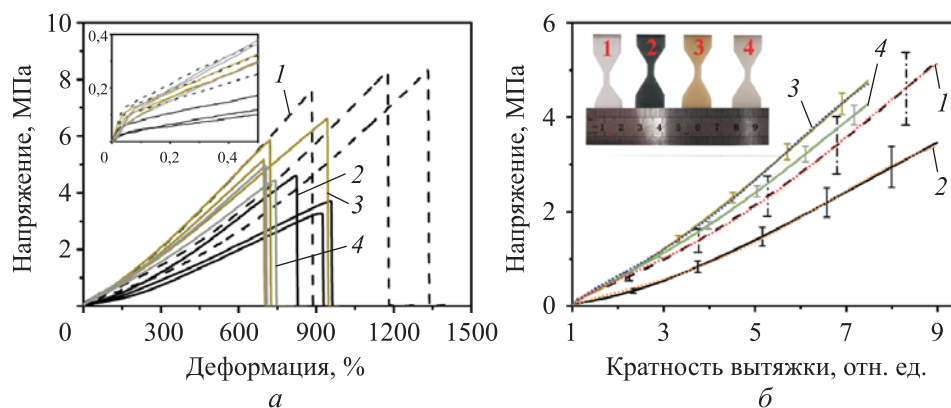


Рис. 2. Полные деформационные кривые (а) и усредненные кривые с указанием абсолютной погрешности (б) для исследуемых образцов:

1 — ненаполненный; 2 — содержащий 5 % (масс.) частиц железа; 3 — то же монтмориллонита; 4 — то же наноцеллюлозы; на вставке рис. 1, а показан начальный участок деформационных кривых, на вставке рис. 1, б — фотография образцов для механических испытаний; штриховые линии на рис. 1, б соответствуют аппроксимации данных моделью Йо

Значения модуля Юнга и усредненные значения констант для упругого потенциала Йо исследуемых композитов

Наполнитель	Модуль Юнга, МПа	$C_1 \cdot 10^{-1}$, МПа	$C_2 \cdot 10^{-3}$, МПа	$C_3 \cdot 10^{-6}$, МПа
Ненаполненный	$2,87 \pm 0,53$	$1,56 \pm 0,34$	$1,45 \pm 0,55$	$-5,31 \pm 3,18$
Железо	$1,11 \pm 0,55$	$0,79 \pm 0,17$	$1,52 \pm 0,32$	$-6,98 \pm 1,32$
Монтмориллонит	$2,28 \pm 0,82$	$1,74 \pm 0,09$	$2,69 \pm 0,36$	$-0,17 \pm 0,03$
Целлюлоза	$1,61 \pm 0,29$	$1,71 \pm 0,12$	$1,93 \pm 0,12$	$-0,11 \pm 0,01$

Введение наполнителей снижает механические свойства композитов относительно ненаполненного эластомера. Следует отметить, что введение в полимерную матрицу наполнителей с существенно более высоким модулем Юнга приводит к снижению его значений у композиционного материала. Наибольшее снижение наблюдается для композита с частицами железа, которые обладают наибольшим модулем Юнга по сравнению с остальными наполнителями: модуль композита 1,11 МПа, а модуль ненаполненного ПДМС 2,87 МПа. Это может быть связано со снижением активности катализатора при отверждении композиционного материала и уменьшением числа полимерных сшивок. Изучение этого процесса представляет собой отдельную научную задачу и находится за рамками представленных исследований. Тем не менее снижение модуля Юнга композиционных материалов является положительным фактором, поскольку должно привести к повышению отклика материала на электрический стимул. Усредненные деформационные и модельные кривые приведены на рис. 2, б, а усредненные константы модели Йо, полученные в процессе аппроксимации, — в таблице. Выбранная модель хорошо описывает поведение материалов как в областях малых (до 50 %), умеренных (до 200 %) и больших (400 % и более) деформаций. Выбор модели гиперупругого материала требует отдельного пояснения.

Широко используемая для описания гиперупругого поведения материалов модель Муни — Ривлина (Mooney — Rivlin) применима для малых и умеренных (до 200 %) деформаций [34], в то время как модели третьего порядка Огдена (Ogden) и Йо (Yeoh) хорошо описывают нелинейное поведение материалов при больших деформациях (на уровне и более 400 %). Однако для построения трехпараметрической модели Огдена необходимо определение сразу шести констант. Требуется учесть и то, что использование в модели Огдена результатов испытаний только на одноосное растяжение может привести к ошибочным результатам и большим погрешностям при прогнозировании свойств материала, например, в испытаниях на сдвиг. При этом модель Йо позволяет хорошо описывать поведение материалов при больших деформациях при наличии только результатов испытаний на одноосное растяжение [35], что и обусловило выбор такой модели в работе. Результаты механических испытаний показывают, что при исследуемой концентрации наполнителей порог перколяции не достигнут.

Электрофизические характеристики композитов также меняются относительно исходного эластомера. Значения проводимости при наполнении возрастают от $1,9 \cdot 10^{-14}$ до $6,2 \cdot 10^{-14}$ См/см (при частоте 10^{-1} Гц)

(рис. 3, а). Данные подтверждают отсутствие перколяционной сетки в композитах при исследуемой концентрации. Для всех образцов наблюдается дисперсия проводимости с частотой, что типично для диэлектрических неупорядоченных сред. Для образцов, наполненных наночастицами — монтмориллонитом и целлюлозой, на частотной зависимости проводимости также наблюдается появление релаксационного процесса в диапазоне высоких ($10^5 \dots 10^6$ Гц) и средних ($10^1 \dots 10^3$ Гц) частот. Следовательно, это выражается в появлении соответствующего максимума на зависимости и отклонении от линейности. Релаксационные процессы хорошо видны на графиках тангенса диэлектрических потерь (рис. 3, б). Вероятно, эти процессы соответствуют поляризации наночастиц наполнителя в структуре диэлектрической полимерной матрицы. В случае композитов с железом поляризация металла — крайне быстро протекающий процесс, поэтому соответствующий релаксационный максимум должен находиться вне диапазона измерений представленного исследования. По положению максимума можно судить о структурной организации наполнителей в диэлектрической среде [36, 37]. Так, в случае композита с целлюлозой время релаксации характерно для поляризации наночастиц, а для образца с монтмориллонитом положение пика ранее было отнесено к поляризации индивидуальных пластин [29]. Таким образом, результаты диэлектрической спектроскопии косвенно свидетельствуют о хорошем диспергировании наполнителя в силиконовой матрице. Значения диэлектрической проницаемости при введении наполнителя возрастают во всем диапазоне значений исследованных частот (см. рис. 3, б). Следует отметить, что наибольший рост в области низких частот (постоянный ток) наблюдается для нанонаполнителей, несмотря на их неметаллическую природу. При этом сила диэлектрической релаксации — разность значений диэлектрической проницаемости при низких и высоких частотах — сильнее всего возрастает для композита с целлюлозой. Таким образом, рост диэлектрической проницаемости при небольшом изменении проводимости и увеличение силы диэлектрической релаксации позволяют ожидать повышенный отклик материала на электрическое поле при возникновении давления Максвелла.

Чувствительность полученных композиционных материалов по сравнению с нативной полимерной пленкой к действию электрического поля исследовали по изменению нормальной силы, направленной перпендикулярно к поверхности пленки. Для всех образцов при приложении электрического потенциала наблюдается снижение значений нормальной силы (рис. 4), что свидетельствует о деформации образца в радиальном направлении и его утонении. На рисунке можно выделить три характерных

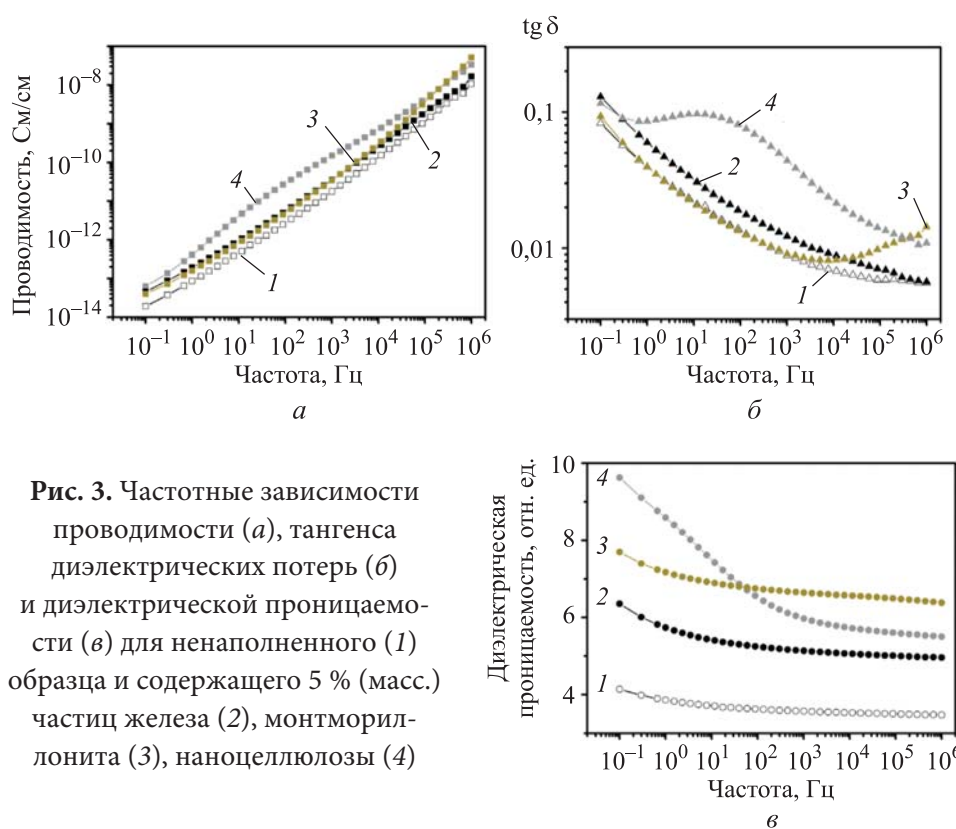


Рис. 3. Частотные зависимости проводимости (а), тангенса диэлектрических потерь (б) и диэлектрической проницаемости (в) для ненаполненного (1) образца и содержащего 5 % (масс.) частиц железа (2), монтмориллонита (3), наноцеллюлозы (4)

временных промежутка: 1) до испытаний — образец помещен в ячейку и зафиксирован до возникновения нормальной силы 1 Н; 2) при приложении электрического поля (период отмечен на рис. 4); 3) в процессе релаксации после снятия потенциала. Отметим, что при включении электрического поля наблюдается резкое уменьшение нормальной силы с последующим плавным снижением, которое более выражено для меньшей напряженности поля (0,84 кВ/мм). Важно, что для композиционных материалов изменение нормальной силы более существенно по сравнению с ненаполненной силиконовой пленкой. Наибольший отклик получен для образцов, наполненных железом и целлюлозой. Увеличение напряженности электрического поля в 3 раза приводит к более существенному снижению значений нормальной силы для всех образцов, при этом влияние внешнего стимула сильнее проявляется для композита с целлюлозой. Неполное восстановление свойств при снятии электрического поля (конечное значение нормальной силы после релаксации) может быть связано с несовершенством измерительной системы и требует дополнительного исследования. Полученные результаты хорошо согласуются с данными механических испытаний и диэлектрической спектроскопии.

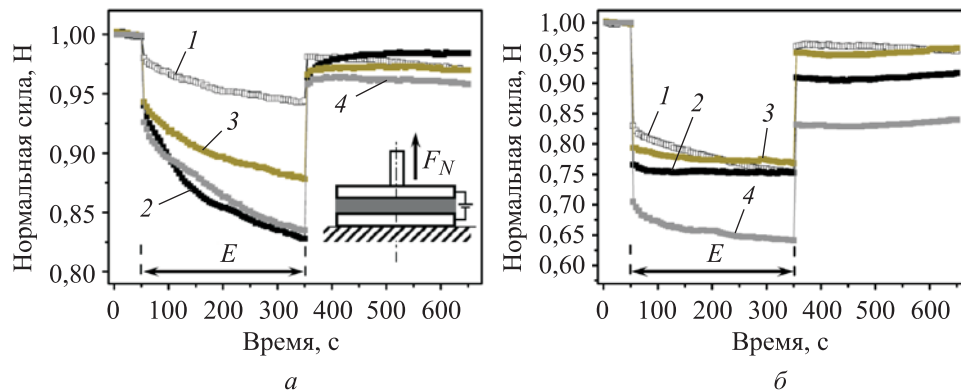


Рис. 4. Изменение нормальной силы под действием электрического поля напряженностью 0,84 (а) и 2,5 кВ/мм (б) для ненаполненного образца (1), содержащего 5 % (масс.) частиц железа (2), монтмориллонита (3), наноцеллюлозы (4) (на вставке приведена принципиальная схема эксперимента)

Заклучение. Получены новые композиционные диэлектрические эластомеры, чувствительные к приложению электрического поля с низкой концентрацией наполнителя. Показана эффективность наноразмерных наполнителей с высоким характеристическим отношением и поляризуемостью при создании материалов с увеличенным откликом на внешний стимул. Введение электрочувствительных наполнителей в силиконовую матрицу приводит к росту давления Максвелла, возникающего под действием электрического поля высокой напряженности, и является перспективным способом создания новых стимул-чувствительных материалов. Эффект достигается вследствие снижения модуля Юнга и возрастания электрофизических характеристик материала. Важным параметром, определяющим отклик исследованных материалов, также является однородность распределения наполнителя в матрице. Показана принципиальная возможность изменения свойств диэлектрических эластомерных материалов путем варьирования природы наполнителя в целях создания «умных» материалов. Определены константы модели Йю, хорошо описывающей механическое поведение материалов при больших деформациях. Тем не менее вопросы влияния концентрации и размеров наполнителя, влияния температуры и предварительной деформации пленок остались за рамками представленной работы и требуют дополнительных исследований. Оптимизация указанных параметров позволит создать новые стимул-чувствительные материалы с высоким откликом и заранее заданными свойствами.

Благодарность

Авторы выражают благодарность ресурсным центрам «Нанозонд», «Электрофизика», «Оптика» и «Полимер» НИЦ «Курчатовский институт» за возможность проведения исследований. Авторы признательны канд. хим. наук С.Н. Малахову и канд. физ.-мат. наук Р.А. Камышинскому за проведение исследований электронной микроскопии, а также А.А. Несмелову за помощь в проведении механических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Acome E., Mitchell S.K., Morrissey T.G., et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*, 2018, vol. 359, no. 6371, pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aao6139>
- [2] Qiu Y., Zhang E., Plamthottam R., et al. Dielectric elastomer artificial muscle: materials innovations and device explorations. *Acc. Chem. Res.*, 2019, vol. 52, iss. 2, pp. 316–325. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00516>
- [3] Shintake J., Cacucciolo V., Floreano D., et al. Soft robotic grippers. *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, iss. 29, art. 1707035. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- [4] Mannsfeld S.C.B., Tee B.C.-K., Stoltenberg R.M., et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Mater.*, 2010, vol. 9, no. 10, pp. 859–864. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2834>
- [5] Araromi O.A., Rosset S., Shea H.R. High-resolution, large-area fabrication of compliant electrodes via laser ablation for robust, stretchable dielectric elastomer actuators and sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, iss. 32, pp. 18046–18053. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b04975>
- [6] Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., et al. Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 2019, vol. 572, pp. 516–519. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1479-6>
- [7] Park J., Choi S., Janardhan A.H., et al. Electromechanical cardioplasty using a wrapped elasto-conductive epicardial mesh. *Sci. Transl. Med.*, 2016, vol. 8, no. 344, p. 344ra86. DOI: <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aad8568>
- [8] O'Halloran A., O'Malley F., McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 104, iss. 7, art. 071101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2981642>
- [9] Liu Y., Liu L., Zhang Z., et al. Dielectric elastomer film actuators: characterization, experiment and analysis. *Smart Mater. Struct.*, 2009, vol. 18, no. 9, art. 095024. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/9/095024>
- [10] He J., Chen Z., Xiao Y., et al. Intrinsically anisotropic dielectric elastomer fiber actuators. *ACS Materials Lett.*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00742>
- [11] Gerratt A.P., Balakrishnan B., Penskiy I., et al. Dielectric elastomer actuators fabricated using a micro-molding process. *Smart Mater. Struct.*, 2014, vol. 23, no. 5, art. 055004. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/5/055004>

- [12] Akbari S., Rosset S., Shea H.R. More than 10-fold increase in the actuation strain of silicone dielectric elastomer actuators by applying prestrain. *EAPAD*, 2013, art. 86871P. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2009912>
- [13] Zakaria S., Morshuis P.H.F., Benslimane M.Y., et al. The electrical breakdown strength of pre-stretched elastomers, with and without sample volume conservation. *Smart Mater. Struct.*, 2015, vol. 24, no. 5, art. 055009. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055009>
- [14] Caspari P., Dunki S.J., Nuesch F.A., et al. Dielectric elastomer actuators with increased dielectric permittivity and low leakage current capable of suppressing electromechanical instability. *J. Mater. Chem. C*, 2018, vol. 6, no. 8, pp. 2043–2053. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7tc05562e>
- [15] Sheima Y., Caspari P., Opris D.M. Artificial muscles: dielectric elastomers responsive to low voltages. *Macromol. Rapid Commun.*, 2019, vol. 40, no. 16, art. 1900205. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.201900205>
- [16] Liu P., Li L., Wang L., et al. Effects of 2D boron nitride (BN) nanoplates filler on the thermal, electrical, mechanical and dielectric properties of high temperature vulcanized silicone rubber for composite insulators. *J. Alloys Compd.*, 2019, vol. 774, pp. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.002>
- [17] Yang D., Zhang L., Liu H., et al. Lead magnesium niobate-filled silicone dielectric elastomer with large actuated strain. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 125, no. 3, pp. 2196–2201. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.36428>
- [18] Zhao H., Zhang L., Yang M.H., et al. Temperature-dependent electro-mechanical actuation sensitivity in stiffness-tunable BaTiO₃/polydimethylsiloxane dielectric elastomer nanocomposites. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no. 9, art. 092904. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4914012>
- [19] Ruan M., Yang D., Guo W., et al. Improved electromechanical properties of brominated butyl rubber filled with modified barium titanate. *RSC Adv.*, 2017, vol. 7, no. 59, pp. 37148–37157. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra05667b>
- [20] Jiang L., Kennedy D., Jerrams S., et al. Enhancement of dielectric properties with the addition of bromine and dopamine modified barium titanate particles to silicone rubber. *MRS Communications*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 437–441. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrc.2016.53>
- [21] Liu H., Zhang L., Yang D., et al. Mechanical, dielectric, and actuated strain of silicone elastomer filled with various types of TiO₂. *Soft Materials*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 363–370. DOI: <https://doi.org/10.1080/1539445X.2012.661821>
- [22] Zhang Y.Y., Wang G.L., Zhang J., et al. Preparation and properties of core-shell structured calcium copper titanate@polyaniline/silicone dielectric elastomer actuators. *Polym. Compos.*, 2017, vol. 40, no. S1, pp. E62–E68. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.24479>
- [23] Wang G.L., Zhang Y.Y., Duan L., et al. Property reinforcement of silicone dielectric elastomers filled with self-prepared calcium copper titanate particles. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2015, vol. 132, no. 39, art. 42613. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.42613>

- [24] Panahi-Sarmad M., Chehrazi E., Noroozi M., et al. Tuning the surface chemistry of graphene oxide for enhanced dielectric and actuated performance of silicone rubber composites. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 198–209.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00042>
- [25] Tian M., Wei Z., Zan X., et al. Thermally expanded graphene nanoplates/polydimethylsiloxane composites with high dielectric constant, low dielectric loss and improved actuated strain. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, vol. 99, pp. 37–44.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.004>
- [26] Liu L., Lei Y., Zhang Z., et al. Fabrication of PDA@SiO₂@rGO/PDMS dielectric elastomer composites with good electromechanical properties. *React. Funct. Polym.*, 2020, vol. 154, art. 104656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104656>
- [27] Rackl M. Material testing and hyperelastic material model curve fitting for Ogden, Polynomial and Yeoh models. *Proc. ScilabTEC*, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29552.25600/1>
- [28] Ploehn H.J., Liu C. Quantitative analysis of montmorillonite platelet size by atomic force microscopy. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, vol. 45, no. 21, pp. 7025–7034.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ie051392r>
- [29] Kuznetsov N.M., Shevchenko V.G., Stolyarova D.Y., et al. Dielectric properties of modified montmorillonites suspensions in polydimethylsiloxane. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018, vol. 135, no. 32, art. 46614. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.46614>
- [30] Bogdanova O.I., Chvalun S.N. Polysaccharide-based natural and synthetic nanocomposites. *Polym. Sci. Ser. A*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 629–658.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965545X16050047>
- [31] Bogdanova O.I., Istomina A.P., Chvalun S.N. Composites based on chitin nanoparticles and biodegradable polymers for medical use: preparation and properties. *Nanotechnol. Russia*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 42–68.
DOI: <https://doi.org/10.1134/s2635167621010031>
- [32] Kuznetsov N.M., Bakirov A.V., Banin E.P., et al. In situ X-ray analysis of montmorillonite suspensions in polydimethylsiloxane: orientation in shear and electric field. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2021, vol. 622, art. 126663.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126663>
- [33] Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Zagoskin Y.D., et al. Specific features of the porous polymeric particle composites application as fillers for electrorheological fluids. *Nanotechnol. Russia*, 2021, vol. 16, no. 6, pp. 840–846.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S2635167621060148>
- [34] Белкин А.Е., Даштиев И.З., Костромицких А.В. Определение параметров упругости полиуретана при больших деформациях по результатам испытаний образцов на кручение и растяжение. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 8, с. 3–10.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-8-3-10>

[35] Xavier M.S., Fleming A.J., Yong Y.K. Finite element modeling of soft fluidic actuators: overview and recent developments. *Adv. Intell. Syst.*, 2021, vol. 3, no. 2, art. 2000187. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.202000187>

[36] Vdovichenko A.Y., Kuznetsov N.M., Shevchenko V.G., et al. The role of charge states in the self-organization of detonation nanodiamond nanoparticles. *Diam. Relat. Mater.*, 2020, vol. 107, art. 107903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107903>

[37] Kuznetsov N.M., Vdovichenko A.Y., Bakirov A.V., et al. The size effect of faceted detonation nanodiamond particles on electrorheological behavior of suspensions in mineral oil. *Diam. Relat. Mater.*, 2022, vol. 125, art. 108967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108967>

Кузнецов Никита Михайлович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Банин Евгений Петрович — канд. техн. наук, инженер-исследователь лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Крупнин Артур Евгеньевич — инженер-исследователь лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Крашенинников Сергей Владимирович — научный сотрудник лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Вдовиченко Артем Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь Ресурсного центра электрофизических методов «Электрофизика» НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Чвалун Сергей Николаевич — чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории полимерных материалов отдела нанобиоматериалов и структур Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатowski институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кузнецов Н.М., Банин Е.П., Крупнин А.Е. и др. Влияние наполнителя на деформацию полидиметилсилоксановых композитов под действием электрического поля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 6 (105), с. 123–143. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-123-143>

**EFFECT OF FILLER ON THE DEFORMATION
OF POLYDIMETHYLSILOXANE COMPOSITES
UNDER AN ELECTRIC FIELD**

N.M. Kuznetsov

E.P. Banin

A.E. Krupnin

S.V. Krasheninnikov

A.Yu. Vdovichenko

S.N. Chvalun

kyz993@yandex.ru

evg.banin@gmail.com

artkrupnin@gmail.com

derevatograf@yandex.ru

vdartem@yandex.ru

s-chvalun@yandex.ru

National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study considers some aspects of the development of new stimuli-responsive materials capable to reversible deformation under an electric field due to the Maxwell pressure. To increase the response of the material to an external stimulus, an approach of polymer composites formation was chosen. Particles of various nature and shape were considered as fillers: powders of iron, montmorillonite and cellulose. Composite elastomeric materials based on polydimethylsiloxane with a low filler content of 5 wt% have been obtained. The morphology of the filler particles was confirmed by electron microscopy. Mechanical properties of the materials in uniaxial tests were studied. The Young’s modulus and constants for the 3-parameter Yeoh model in the range of deformations up to 800 % were determined. The electro-physical properties of the materials, as well as their response to an electric field at different strengths of 0.84 and 2.5 kV/mm have been studied. The effect of the filler nature on the conductivity and permittivity of composite materials was revealed. The data of mechanical and dielectric studies indicate that the filler concentration is below the percolation threshold for all composites. The composite with cellulose ex-

Keywords

Stimuli-responsive materials, elastomers, composites, Maxwell pressure, dielectric spectroscopy, hyperelastic materials, Yeoh model

hibits the greatest response to an external stimulus over the considered materials, which is determined by the balance of two factors: the value of Young's modulus and the values of electrophysical characteristics. Directions for further research were determined and the prospects for the dielectric elastomers creation with predetermined properties were briefly discussed

Received 27.05.2022

Accepted 20.06.2022

© Author(s), 2022

The study was financially supported by state assignment in National Research Center "Kurchatov Institute"

REFERENCES

- [1] Acome E., Mitchell S.K., Morrissey T.G., et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*, 2018, vol. 359, no. 6371, pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aao6139>
- [2] Qiu Y., Zhang E., Plamthottam R., et al. Dielectric elastomer artificial muscle: materials innovations and device explorations. *Acc. Chem. Res.*, 2019, vol. 52, iss. 2, pp. 316–325. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00516>
- [3] Shintake J., Cacucciolo V., Floreano D., et al. Soft robotic grippers. *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, iss. 29, art. 1707035. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- [4] Mannsfeld S.C.B., Tee B.C.-K., Stoltenberg R.M., et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Mater.*, 2010, vol. 9, iss. 10, pp. 859–864. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2834>
- [5] Araromi O.A., Rosset S., Shea H.R. High-resolution, large-area fabrication of compliant electrodes via laser ablation for robust, stretchable dielectric elastomer actuators and sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, iss. 32, pp. 18046–18053. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b04975>
- [6] Cacucciolo V., Shintake J., Kuwajima Y., et al. Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 2019, vol. 572, pp. 516–519. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1479-6>
- [7] Park J., Choi S., Janardhan A.H., et al. Electromechanical cardioplasty using a wrapped elasto-conductive epicardial mesh. *Sci. Transl. Med.*, 2016, vol. 8, no. 344, p. 344ra86. DOI: <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aad8568>
- [8] O'Halloran A., O'Malley F., McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 104, iss. 7, art. 071101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2981642>
- [9] Liu Y., Liu L., Zhang Z., et al. Dielectric elastomer film actuators: characterization, experiment and analysis. *Smart Mater. Struct.*, 2009, vol. 18, no. 9, art. 095024. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/9/095024>
- [10] He J., Chen Z., Xiao Y., et al. Intrinsically anisotropic dielectric elastomer fiber actuators. *ACS Materials Lett.*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00742>

- [11] Gerratt A.P., Balakrisnan B., Penskiy I., et al. Dielectric elastomer actuators fabricated using a micro-molding process. *Smart Mater. Struct.*, 2014, vol. 23, no. 5, art. 055004. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/5/055004>
- [12] Akbari S., Rosset S., Shea H.R. More than 10-fold increase in the actuation strain of silicone dielectric elastomer actuators by applying prestrain. *EAPAD*, 2013, art. 86871P. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2009912>
- [13] Zakaria S., Morshuis P.H.F., Benslimane M.Y., et al. The electrical breakdown strength of pre-stretched elastomers, with and without sample volume conservation. *Smart Mater. Struct.*, 2015, vol. 24, no. 5, art. 055009. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055009>
- [14] Caspari P., Dunki S.J., Nuesch F.A., et al. Dielectric elastomer actuators with increased dielectric permittivity and low leakage current capable of suppressing electromechanical instability. *J. Mater. Chem. C*, 2018, vol. 6, no. 8, pp. 2043–2053. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7tc05562e>
- [15] Sheima Y., Caspari P., Opris D.M. Artificial muscles: dielectric elastomers responsive to low voltages. *Macromol. Rapid Commun.*, 2019, vol. 40, no. 16, art. 1900205. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.201900205>
- [16] Liu P., Li L., Wang L., et al. Effects of 2D boron nitride (BN) nanoplates filler on the thermal, electrical, mechanical and dielectric properties of high temperature vulcanized silicone rubber for composite insulators. *J. Alloys Compd.*, 2019, vol. 774, pp. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.002>
- [17] Yang D., Zhang L., Liu H., et al. Lead magnesium niobate-filled silicone dielectric elastomer with large actuated strain. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 125, no. 3, pp. 2196–2201. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.36428>
- [18] Zhao H., Zhang L., Yang M.H., et al. Temperature-dependent electro-mechanical actuation sensitivity in stiffness-tunable BaTiO₃/polydimethylsiloxane dielectric elastomer nanocomposites. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no. 9, art. 092904. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4914012>
- [19] Ruan M., Yang D., Guo W., et al. Improved electromechanical properties of brominated butyl rubber filled with modified barium titanate. *RSC Adv.*, 2017, vol. 7, no. 59, pp. 37148–37157. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra05667b>
- [20] Jiang L., Kennedy D., Jerrams S., et al. Enhancement of dielectric properties with the addition of bromine and dopamine modified barium titanate particles to silicone rubber. *MRS Communications*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 437–441. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrc.2016.53>
- [21] Liu H., Zhang L., Yang D., et al. Mechanical, dielectric, and actuated strain of silicone elastomer filled with various types of TiO₂. *Soft Mater.*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 363–370. DOI: <https://doi.org/10.1080/1539445X.2012.661821>
- [22] Zhang Y.Y., Wang G.L., Zhang J., et al. Preparation and properties of core-shell structured calcium copper titanate@polyaniline/silicone dielectric elastomer actuators. *Polym. Compos.*, 2017, vol. 40, no. S1, pp. E62–E68. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.24479>

- [23] Wang G.L., Zhang Y.Y., Duan L., et al. Property reinforcement of silicone dielectric elastomers filled with self-prepared calcium copper titanate particles. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2015, vol. 132, no. 39, art. 42613. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.42613>
- [24] Panahi-Sarmad M., Chehrazi E., Noroozi M., et al. Tuning the surface chemistry of graphene oxide for enhanced dielectric and actuated performance of silicone rubber composites. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00042>
- [25] Tian M., Wei Z., Zan X., et al. Thermally expanded graphene nanoplates/polydimethylsiloxane composites with high dielectric constant, low dielectric loss and improved actuated strain. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, vol. 99, pp. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.004>
- [26] Liu L., Lei Y., Zhang Z., et al. Fabrication of PDA@SiO₂@rGO/PDMS dielectric elastomer composites with good electromechanical properties. *React. Funct. Polym.*, 2020, vol. 154, art. 104656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104656>
- [27] Rackl M. Material testing and hyperelastic material model curve fitting for Ogden, Polynomial and Yeoh models. *Proc. ScilabTEC*, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29552.25600/1>
- [28] Ploehn H.J., Liu C. Quantitative analysis of montmorillonite platelet size by atomic force microscopy. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, vol. 45, no. 21, pp. 7025–7034. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie051392r>
- [29] Kuznetsov N.M., Shevchenko V.G., Stolyarova D.Y., et al. Dielectric properties of modified montmorillonites suspensions in polydimethylsiloxane. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018, vol. 135, no. 32, art. 46614. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.46614>
- [30] Bogdanova O.I., Chvalun S.N. Polysaccharide-based natural and synthetic nanocomposites. *Polym. Sci. Ser. A*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 629–658. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965545X16050047>
- [31] Bogdanova O.I., Istomina A.P., Chvalun S.N. Composites based on chitin nanoparticles and biodegradable polymers for medical use: preparation and properties. *Nanotechnol. Russia*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 42–68. DOI: <https://doi.org/10.1134/s2635167621010031>
- [32] Kuznetsov N.M., Bakirov A.V., Banin E.P., et al. In situ X-ray analysis of montmorillonite suspensions in polydimethylsiloxane: orientation in shear and electric field. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2021, vol. 622, art. 126663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126663>
- [33] Kuznetsov N.M., Kovaleva V.V., Zagoskin Y.D., et al. Specific features of the porous polymeric particle composites application as fillers for electrorheological fluids. *Nanotechnol. Russia*, 2021, vol. 16, no. 6, pp. 840–846. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2635167621060148>
- [34] Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Kostromitskikh A.V. Determining polyurethane elastic parameters at large strains using torsion and tensile test results. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2016, no. 8, pp. 3–10 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-8-3-10>

[35] Xavier M.S., Fleming A.J., Yong Y.K. Finite element modeling of soft fluidic actuators: overview and recent developments. *Adv. Intell. Syst.*, 2021, vol. 3, no. 2, art. 2000187. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.202000187>

[36] Vdovichenko A.Y., Kuznetsov N.M., Shevchenko V.G., et al. The role of charge states in the self-organization of detonation nanodiamonds nanoparticles. *Diam. Relat. Mater.*, 2020, vol. 107, art. 107903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107903>

[37] Kuznetsov N.M., Vdovichenko A.Y., Bakirov A.V., et al. The size effect of faceted detonation nanodiamond particles on electrorheological behavior of suspensions in mineral oil. *Diam. Relat. Mater.*, 2022, vol. 125, art. 108967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108967>

Kuznetsov N.M. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Researcher, Laboratory of Polymer Materials of the Nanobiomaterials and Structures Department of the Kurchatov Complex of NBICS-Nature-Like Technologies, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Banin E.P. — Cand. Sc. (Eng.), Research Engineer, Laboratory of Polymer Materials of the Nanobiomaterials and Structures Department of the Kurchatov Complex of NBICS-Nature-Like Technologies, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Krupnin A.E. — Research Engineer, Laboratory of Polymer Materials of the Nanobiomaterials and Structures Department of the Kurchatov Complex of NBICS-Nature-Like Technologies, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Krashennnikov S.V. — Researcher, Laboratory of Polymer Materials of the Nanobiomaterials and Structures Department of the Kurchatov Complex of NBICS-Nature-Like Technologies, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Vdovichenko A.Yu. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Research Engineer, Resource Center for Electrophysical Methods “Electrophysics”, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Chvalun S.N. — corresponding member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Chem.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Polymer Materials of the Nanobiomaterials and Structures Department of the Kurchatov Complex of NBICS-Nature-Like Technologies, National Research Center “Kurchatov Institute” (Akademika Kurchatova ploshchad 1, Moscow, 123182 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kuznetsov N.M., Banin E.P., Krupnin A.E., et al. Effect of filler on the deformation of polydimethylsiloxane composites under an electric field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 6 (105), pp. 123–143 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-123-143>