

УДК 536.2, 537.31, 539.3

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА В ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

© 2023 г. П. А. Люкшин^{a,*}, Б. А. Люкшин^{a,b,c,**},
С. В. Панин^{a,d,***}, С. А. Бочкарева^{a,b,****}

^aИнститут физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

^bТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

^cНациональный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

^dНациональный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

*e-mail: petrljuk@ispms.tsc.ru

**e-mail: lba2008@yandex.ru

***e-mail: svp@ispms.tsc.ru

****e-mail: bochkarevas@ispms.ru

Поступила в редакцию 27.04.2022 г.

После доработки 03.06.2022 г.

Принята к публикации 20.06.2022 г.

В электропроводящих композитах, помещенных в электрическое поле, происходит выделение тепла и формируются неоднородные температурные поля. Это, в свою очередь, индуцирует деформации и напряжения в таких композитах. В работе решается последовательность несвязанных краевых задач: электропроводности в поле постоянного электрического тока, теплопроводности, термоупругости. Показано, что при протекании электрического тока в медно-графитовом и наполненном порошком меди полимерном композите возникают перемещения, деформации и напряжения даже в том случае, когда компоненты композита не обладают пьезоэффектом.

Ключевые слова: композит с полимерной матрицей, теплопроводность, электропроводность, термоупругость, теплофизические свойства, графит, метод конечных элементов, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0572329922600232, EDN: KLQDXU

1. Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) получают все более широкое распространение при решении практических задач. Это обусловлено как расширением номенклатуры ПКМ, так и возможностью придания им уникальных функциональных свойств. Используются разнообразные по составу, размеру и свойствам наполнители, описания и рекомендации по применению которых достаточно широко представлены на страницах научной и справочной литературы [1, 2]. Полимерные матрицы в силу своего строения не обладают свойством электропроводности, и традиционно применяются в качестве электрических изоляторов. Однако контролируемое введение в их состав токопроводящих включений, в том числе наноапполнителей, способно превратить их в композиты, обладающие рядом ценных физических и функциональных свойств.

Одним из наиболее популярных наноапполнителей для придания полимерным матрицам свойства электропроводности являются углеродные нанотрубки (УНТ).

Так, в работе [3] анализирован ряд полимерных нанокомпозитов, формируемых различными технологическими методами. Вводились привитые к полимеру и чистые УНТ, а в качестве матрицы использовались латекс и полистирол. Оценивались как электрические, так и механические свойства нанокомпозитов. Показано, что одинаковые параметры микроструктуры не обязательно обеспечивают идентичные механические и электрофизические свойства композитов.

Функциональным наполнителем является, например, порошок алюминия, который в работе [4] добавляли в акрило-нитрильную бутадиеновую резину. Подобное наполнение сопровождалось снижением предела текучести и удлинения при разрыве. Показано существование известного перколяционного перехода (порога). Обсуждается известный механизм проводимости Пула–Френкеля (Poole–Frenkel conduction mechanism) – перенос электронов с помощью ловушек в электрическом изоляторе), преобладающий при комнатной температуре. Использование модели С. Цангариса (S. Tsangaris) позволило получить хорошее согласие между рассчитанными и экспериментально измеренными значениями диэлектрической постоянной.

Однако, помимо придания полимерам электропроводности как таковой, возникает вопрос, как возникающее электрическое поле влияет на формирование механических напряжений. Обычно проявление механических эффектов в поле электрического тока наблюдается в пьезоматериалах. Однако эта задача актуальна, в частности, и в приложении к твердотельным полимерным электролитам, а именно литий-ионным твердотельным аккумуляторам [5]. В цитируемой работе с помощью конечно-элементного анализа показано, что в силу связности развивающихся при разряде процессов формируются неоднородные профили концентрации ионов, обуславливающие появление напряжений и деформаций, которые могут приводить к механическому разрушению полимера и выходу батарей из строя.

В другой работе на эту тему [6] показано, что низкая электрическая эффективность трехмерных твердотельных литий-ионных батарей обусловлена не только их неоднородной 3D-структурой, но и низкой ионной проводимостью электролита, а также интенсивностью диффузии на катоде. Это приводило к крайне неоднородному распределению плотности тока и неэффективному использованию катода.

Помимо “батарейных” приложений вопросы взаимосвязи механических и электрических полей изучали в приложении к электропроводящим полимерным покрытиям [7]. При этом анализировали взаимосвязь микроструктуры и деформационного отклика. Исследованы процессы, индуцированные термомеханическим нагружением, с позиции их влияния на развитие вязко-хрупкого перехода, а также растрескивание покрытия в областях наиболее крупных дефектов макромолекул.

Интерес к электропроводящим полимерам вызван не только возможностью обеспечения “настраиваемых” электрических свойств, но и простотой синтеза и изготовления, а также устойчивостью ко многим факторам окружающей среды [8]. В цитируемом обзоре рассмотрены модели транспорта электрического тока, объясняющие механизм проводимости, а также достигаемые физические свойства, включая оптические и механические.

В развитие аспектов накопителей энергии (energy storage) в работе [9] рассмотрены аспекты создания проводящих полимеров, обладающих требуемыми упругими свойствами, а также способностью к генерации/запасанию энергии. На примере эластичного проводящего полимера поли(3,4-этилендиокситиофен) показана возможность его применения для создания деформируемых органических термоэлектрических модулей. Данную тему продолжает работа [10], в которой исследованы характеристики токопроводящих полимеров с позиции механических (деформация, скорость деформации, напряжения, силы, модуль упругости) и электрических (емкость) свойств. Указанные параметры анализируются с позиции (электрофизической) активации полимера, а также оптимизации условий его синтеза.

Таблица 1. Свойства материалов

Свойства	Поли(3,4-этиленди- окситиофен)	Графит измельченный	Медный порошок
Модуль упругости E , Па	1.0×10^9	5.8×10^9	1.23×10^{11}
Коэффициент Пуассона ν	0.35	0.25	0.3
Коэффициент линейного расширения α , K^{-1}	11.0×10^{-5}	6.0×10^{-6}	16.5×10^{-6}
Удельная теплоемкость C , Дж/(кг · К)	2300	750	380
Плотность ρ , кг/м ³	1333	1750	8900
Коэффициент теплопро- водности K , Вт/(м · К)	0.4	1.2	385
Удельная электрическая проводимость, $Om^{-1} \cdot m^{-1}$	800	1.25×10^6	5.9×10^7

В работе [11] проведен обзор моделей электропроводности проводящих полимеров и полимерных композитов как потенциальных материалов для изготовления полимерных электролитических мембран для топливных ячеек. Показано, что путем управления ориентацией наполнителя в токопроводящих полимерных композитах можно одновременно повысить их механические свойства и электропроводность.

Еще одним перспективным направлением использования токопроводящих полимеров являются актуаторы [12]. Для придания данного функционального свойства необходимо формировать проводящую взаимопроникающую полимерную сеть. С этой целью формировали сеть из полиэтилоксида и полибутадиена, в которую был диспергирован проводящий полимер поли(3,4-этилендиокситиофен). Исследования его свойств проведены с помощью динамического механического анализа (ДМА).

Таким образом, создание токопроводящих полимеров имеет некоторую практику и несомненную перспективу. Традиционно реакция на электрическое поле в виде появления напряжений и деформаций связывается с пьезоэлектрическими свойствами материала [13–16]. Электропроводность композита порождает ряд эффектов в виде выделения тепла и появления неоднородных температурных полей, что, в свою очередь, вызывает наличие деформаций и напряжений в структурно неоднородном материале, не связанных с пьезоэффектами. По этой причине исследование поведения армированных/наполненных пластиков в электрических полях представляет научный и практический интерес.

Для изучения этой проблемы в настоящей работе решается последовательность несвязанных краевых задач электропроводности, теплопроводности, термоупругости для структурно-неоднородного тела. В результате определяется напряженно-деформированное состояние в композитах, по которым протекает постоянный электрический ток. Задачи решались применительно к наполненному полимерному композиту “поли(3,4-этилендиокситиофен) – медный порошок” и композиту медь–графит. В расчете использовались свойства для измельченного графита.

Свойства материалов, используемые для расчета свойств композитов, приведены в табл. 1.

2. Решение задачи электропроводности для композита. Электрическое поле постоянного тока в ячейке композиционного материала (КМ) описывается следующими уравнениями [17, 18]:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0, \quad \bar{\delta} = \sigma \cdot \bar{E}, \quad \operatorname{div} \bar{\delta} = 0 \quad (2.1)$$

где $\bar{\delta}$ — плотность тока, $\bar{\sigma}$ — удельная электрическая проводимость, $\bar{E}$ — напряженность электрического поля.

Введем новую переменную ϕ — потенциал электрического поля. Напряженность электрического поля связана с потенциалом следующим соотношением:

$$\bar{E} = -\text{grad}\phi$$

Подставляя ее в (2.1), получим уравнение Лапласа:

$$\text{div}(-\sigma \cdot \text{grad}\phi) = 0 \quad (2.2)$$

Для определения потенциала электрического поля постоянного тока в рассматриваемой области ABCD (рис. 1, а) необходимо решить уравнение Лапласа (2.2) с граничными условиями, например, Неймана и Дирихле ϕ .

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{AD} = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{BC} = 0$$

$$\phi|_{AB} = -0.01, \quad \phi|_{DC} = 0.01$$

Электрический потенциал на границах АВ и DC принимался равным 0.01 В. Для электрического потенциала ϕ на границе двух сред (матрицы и включений) с различными проводимостями σ_1, σ_2 выполняются условия равенства потенциалов и нормальных компонент плотности тока [17, 18]

$$\phi_1 = \phi_2, \quad \sigma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$$

Решение уравнения Лапласа (2.2) эквивалентно отысканию минимума функционала χ [19]

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dV$$

Минимизация функционала позволяет получить систему алгебраических уравнений

$$\frac{\partial \chi}{\partial \phi_i} = \sum_{e=1}^n [k^{(e)}] \{\phi\} = 0$$

или

$$[K] \{\phi\} = \{F\} \quad (2.3)$$

где $[K] = \sum_{e=1}^n [k^{(e)}]$ — глобальная матрица электропроводности (аналог матрицы жесткости в задачах механики),

$[k^{(e)}]$ — матрица “жесткости” одного элемента,

$\{\phi\}$ — вектор неизвестных значений потенциала,

$\{F\}$ — вектор “нагрузки” в задаче электропроводности.

Система алгебраических уравнений (2.3) решается методом Гаусса [20].

Матрица “жесткости” конечного элемента в задачах электропроводности по форме совпадает с матрицей “жесткости” в задачах электростатики и теплопроводности

$$[k^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \cdot [B^{(e)}] dV \quad (2.4)$$

Матрица $[D^{(e)}]$, входящая в (2.4), характеризует физические свойства элемента, в случае задачи электропроводности равна

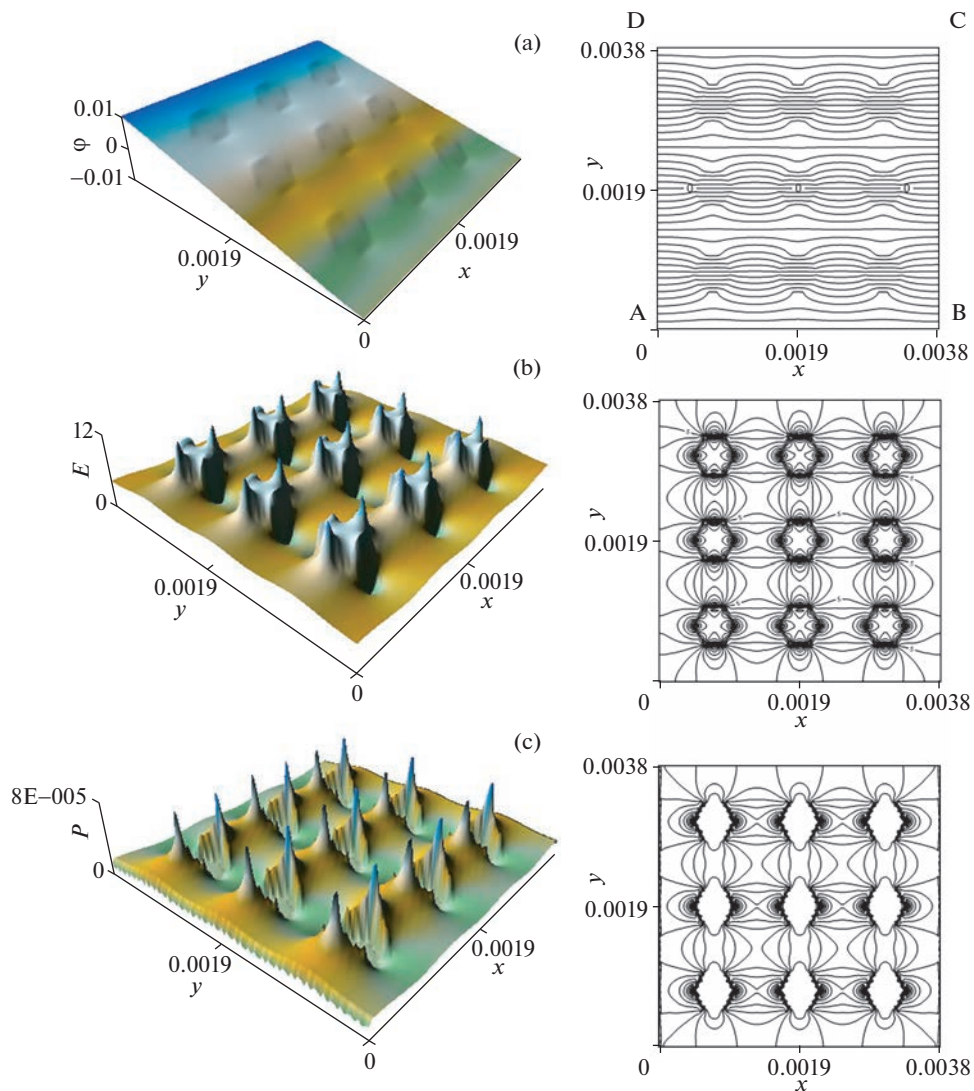


Рис. 1. Поверхности и изолинии для композита “медь–графит” в плоскости xy (м): (а) – скалярный электрический потенциал (φ , в); (б) – напряженность электрического поля (E , в/м); (с) – мощность тепловых потерь электрического поля постоянного тока (P , Вт).

$$[D^{(e)}] = \begin{bmatrix} \sigma_e & 0 \\ 0 & \sigma_e \end{bmatrix}$$

Матрица $[B^{(e)}]$ (содержащая производные от функции формы), входящая в (2.4), может быть записана как:

$$[B^{(e)}] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}$$

где A — площадь одного конечного элемента,

$$b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j.$$

Коэффициенты b_j, b_k, c_j, c_k получаются круговой перестановкой индексов.

Мощность тепловых потерь в проводнике объемом V вычисляется по интегральной формуле Джоуля—Ленца [18]

$$P = \int_V \sigma E^2 dV$$

где σ — удельная электрическая проводимость, E — напряженность электрического поля, V — объем.

На рис. 1, 2 приведены результаты решения задачи электропроводности для композитов “медь—графит” и “поли(3,4-этилендиокситиофен) — медный порошок”.

Следует отметить, что в случае композита “медь—графит” проводимость матрицы на порядок превышает проводимость включений, в случае композита “поли(3,4-этилендиокситиофен) — медный порошок” проводимость матрицы меньше проводимости включений на 4 порядка. Поэтому интегральная мощность тепловых потерь в ячейке композита “медь—графит” равна $P_{ABCD} = 0.563$ Вт (рис. 1, с), а в композите “поли (3,4-этилендиокситиофен) — медный порошок” $P_{ABCD} = 0.143 \times 10^{-4}$ Вт (рис. 2, с), т.е. различие составляет 4 порядка. На рис. 1, б и 2, б в разных композитах напряженность практически одинакова, но по изолиниям видно, что детальное распределение напряженности по ячейке отличается, в связи с разным соотношением проводимостей матрицы и включений. По этой же причине отличаются и изолинии электрического потенциала разных композитов (рис. 1, а и 2, а).

Далее предполагается, что вся мощность тепловых потерь, которая выделяется при прохождении электрического тока в композите, расходуется на повышение температуры. Для вычисления поля температуры в композите, обусловленной нагревом вследствие прохождения электрического тока, решается нестационарная задача теплопроводности.

3. Решение краевой задачи теплопроводности для композита. Уравнение теплопроводности для двумерного случая имеет вид [19, 20]:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \kappa \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

$$\lambda = c \cdot \rho$$

где λ — параметр материала, c — удельная теплоемкость материала, ρ — плотность, κ — коэффициент теплопроводности.

На краях АВ и DC задавалась температура (условия Дирихле)

$$T|_{AB} = 24.0; \quad T|_{DC} = 24.0$$

На краях AD и BC задавались условия симметрии (условия Неймана)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{AD} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{BC} = 0$$

Начальная температура в расчетной области ABCD равна нулю, $T|_{t=0} = 0$.

На границе двух фаз с различными теплофизическими характеристиками выполняются условия идеального контакта: равенство температур и тепловых потоков [19]:

$$T_1 = T_2, \quad K_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}$$

Решение нестационарной двумерной задачи теплопроводности эквивалентно минимизации функционала

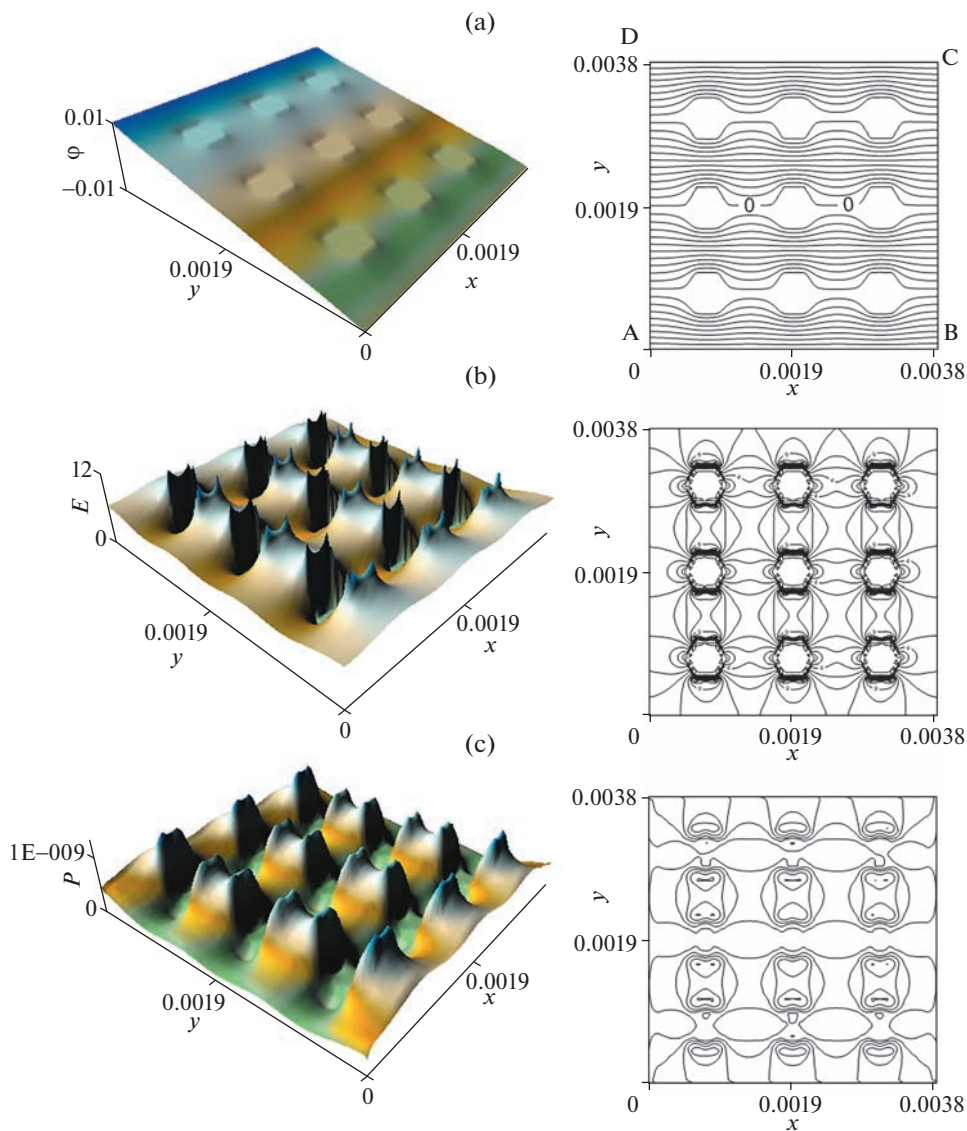


Рис. 2. Поверхности и изолинии для композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)—медный порошок” в плоскости xu (м): (а) — скалярный электрический потенциал (ϕ , в); (б) — напряженность электрического поля (E , в/м); (с) — мощность тепловых потерь электрического поля постоянного тока (P , Вт).

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + 2\lambda \frac{\partial T}{\partial t} T \right] dV$$

На рис. 3 приведены результаты решения нестационарной задачи теплопроводности в композитах “медь—графит” и “поли(3,4-этилендиокситиофен)—медный порошок”.

Ячейке композита “медь—графит” сообщено количество теплоты $\Delta Q = 0.034$ Дж, соответствующее полученной выше мощности тепловых потерь при прохождении

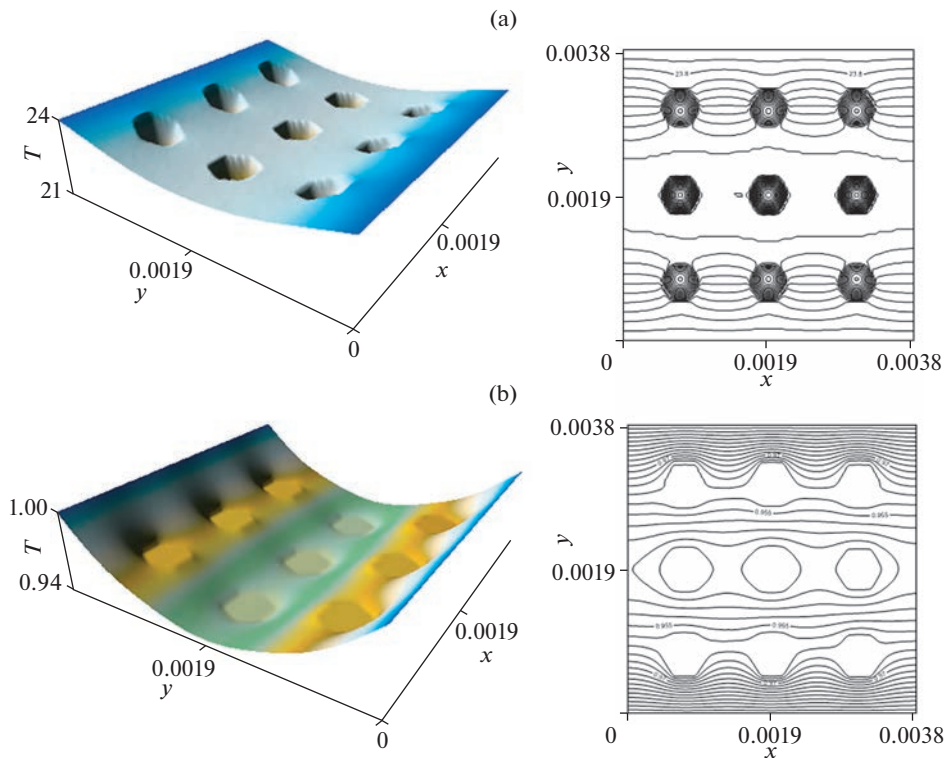


Рис. 3. Поверхности и изолинии распределения температуры (T , °C) в композитах в плоскости xu (м): а) “медь–графит”; б) “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок”.

электрического тока $P = 0.562$ Вт за время $\Delta t = 0.06$ с (рис. 3, а), а композиту “поли(3,4-этилендиокситиофен) – медный порошок” сообщено количество теплоты $\Delta Q = 0.00136$ Дж за время $\Delta t = 96$ с (рис. 3, б).

Температура в композите “медь–графит” при прохождении электрического тока повышается до 24°C за 0.06 секунды, а температура в композите “поли(3,4-этилендиокситиофен) – медный порошок” повышается на 1°C за 96 секунд.

В композите “медь–графит” коэффициент теплопроводности включений графита на два порядка меньше проводимости матрицы (медь), а в полимерном композите “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” теплопроводность включений выше на 3 порядка. Вследствие большей проводимости матрицы температура при прохождении электрического тока в композите “медь–графит” повышается на порядок больше, чем в композите с полимерной матрицей “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок”.

4. Решение задачи термоупругости для структурно-неоднородного тела. Для расчета напряженно-деформированного состояния композита при изменении поля температуры используется метод конечных элементов [21, 22]. Для этого записывается функционал энергии упругого тела при наличии в нем начальных деформаций ϵ_0 . Из условия минимума функционала энергии Π [19]

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = 0$$

получается система линейных алгебраических уравнений

$$[K]\{U\} = \{F\}$$

где $\{U\}$ – вектор перемещений, $[K]$ – глобальная матрица жесткости механической системы, $\{F\}$ – вектор нагрузок.

Глобальная матрица жесткости сетки конечных элементов равна сумме матриц жесткости отдельных элементов:

$$[K] = \sum_{e=1}^n [k^{(e)}]$$

а матрица жесткости отдельного элемента записывается в следующем виде [19]:

$$[k^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \cdot [B^{(e)}] dV$$

Матрица упругих характеристик $[D]$ для изотропного материала равна:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{12} & d_{11} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

В предыдущем выражении величины d_{11}, d_{12} равны, соответственно:

$$d_{11} = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad d_{12} = \frac{E\nu}{1 - \nu^2}, \quad d_{33} = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

где E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона.

Глобальный вектор сил $\{F\}$ равен сумме векторов сил отдельных элементов $\{f^{(e)}\}$

$$\{F\} = \sum_e \{f^{(e)}\}$$

где вектор сил одного конечного элемента при наличии начальных деформаций ϵ_0 запишется следующим образом:

$$\{f^{(e)}\} = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \cdot \{\epsilon_0\} dV$$

Вектор температурной деформации в случае плоского напряженного состояния равен

$$\{\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

где ΔT – изменение температуры,

α – коэффициент линейного теплового расширения.

Закон Гука запишется в виде

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\})$$

На границах двух фаз выполняются условия идеального контакта, а именно равенство векторов перемещений и нормальных напряжений.

Граничные условия при решении задачи термоупругости следующие (см. рис. 4, а): на линии O_3O_4 перемещение вдоль оси y равно нулю, на линии O_1O_2 перемещение вдоль оси x равно нулю. Кромки расчетной области ABCD свободны от напряжений.

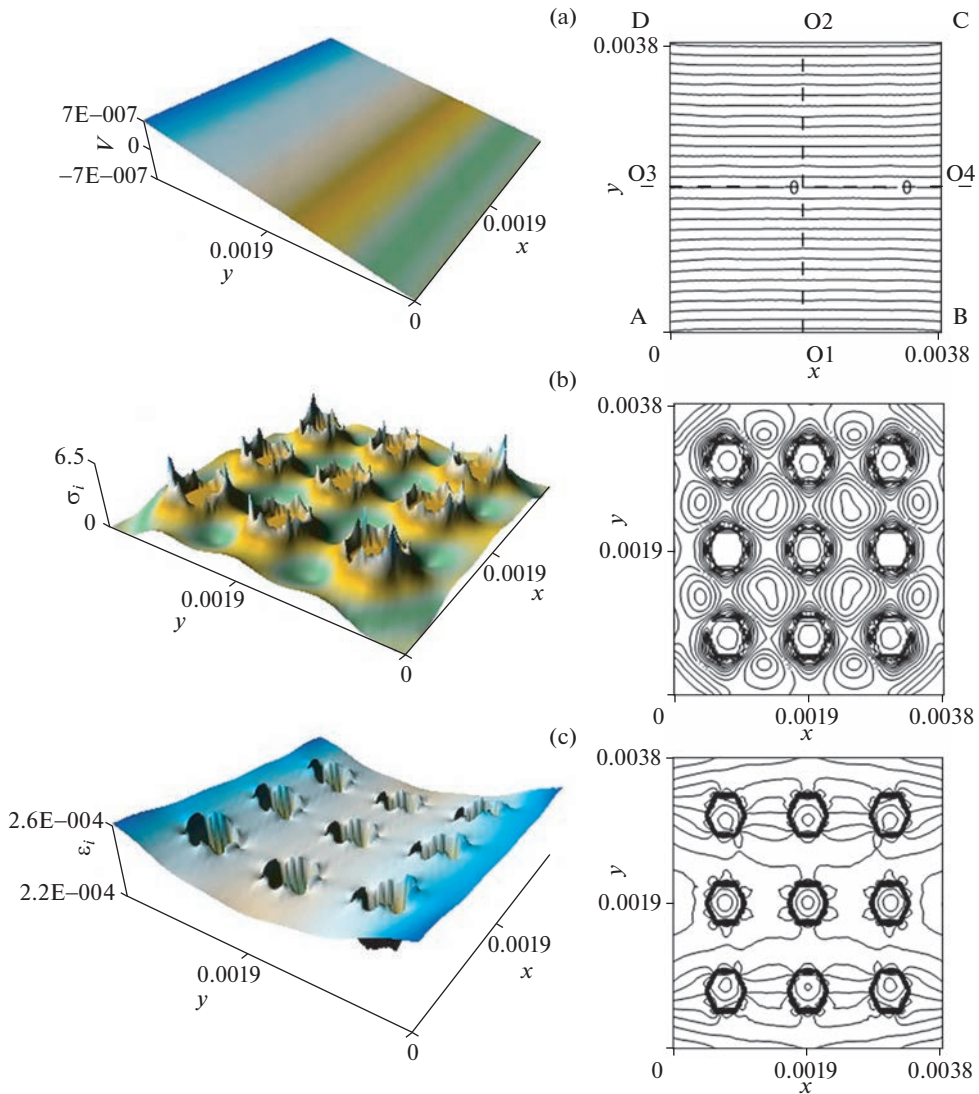


Рис. 4. Поверхности и изолинии в ячейке композита “медь–графит”: (a) – перемещения вдоль оси y (U , м); (b) – интенсивность напряжений (σ_i , МПа) в плоскости xy (м), (c) – интенсивность деформаций (ϵ_i).

На рис. 4, 5 приведены результаты решения задачи термоупругости для композита “медь–графит” и композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” при температурном поле приведенном на рис. 3.

На рис. 4, а поле перемещений для композита “медь–графит” однородно, в отличие от поля перемещений для композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” (рис. 5, а), вследствие небольшого отличия в коэффициентах температурного расширения матрицы и включений. Из рис. 4, b и 5, b видно, что интенсивность напряжений в композите “медь–графит” превышает интенсивность напряжений в композите “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” примерно в 50 раз.

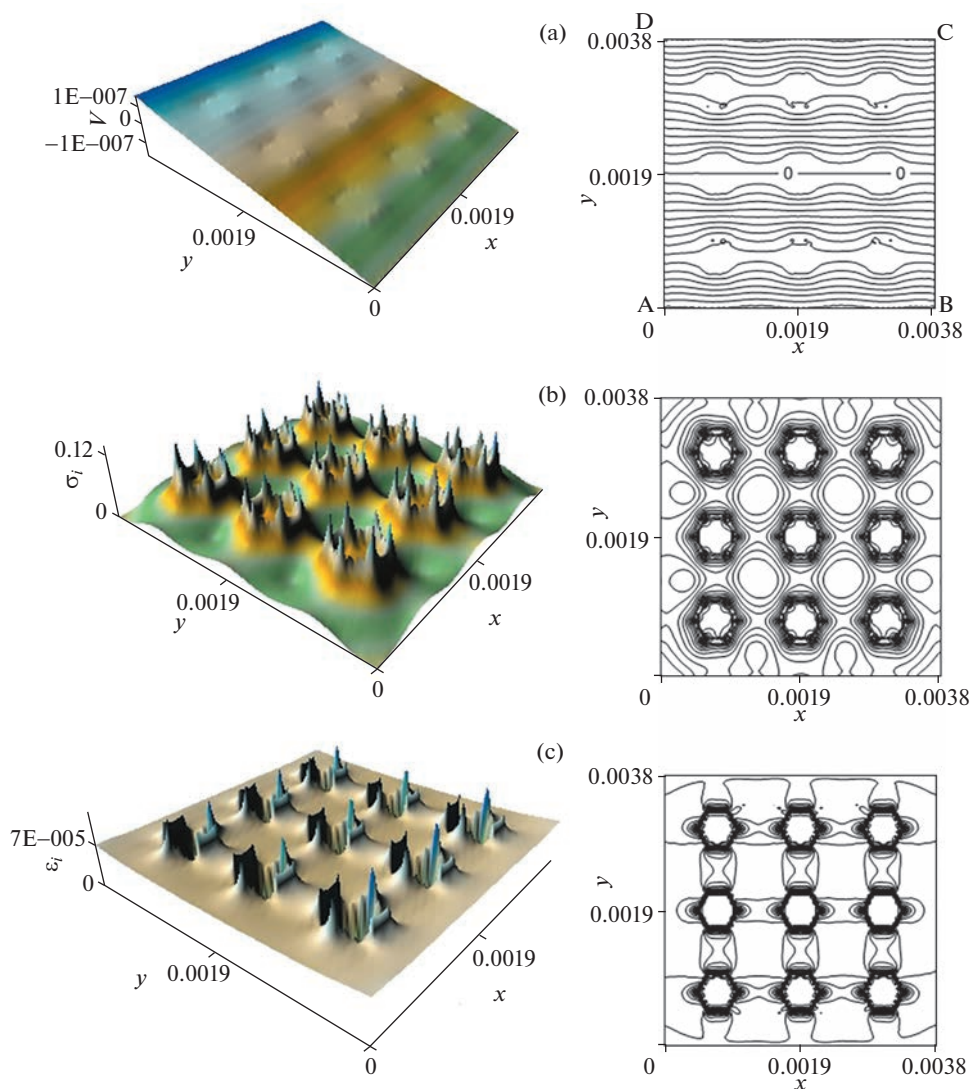


Рис. 5. Поверхности и изолинии в ячейке композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)—медный порошок”: (a) — перемещения вдоль оси y (V , м); (b) — интенсивность напряжений (σ_y , МПа), (c) — интенсивность деформаций (ϵ_y).

Результаты параметрических исследований влияния напряженности электрического поля на интенсивность деформаций и интенсивность напряжений в композите “медь—графит” приведены на рис. 6.

При изменении напряженности поля в 10 раз, с 0.46 до 4.6 В/м, интенсивность деформаций в композите “медь—графит” изменяется от 4.3×10^{-6} до 2.6×10^{-4} , интенсивность напряжений изменяется от 0.1 до 6.5 МПа, т.е. примерно в 60 раз. В проводнике количество теплоты определяется законом Джоуля—Ленца, в соответствии с которым это количество пропорционально квадрату протекающего тока, а сила тока

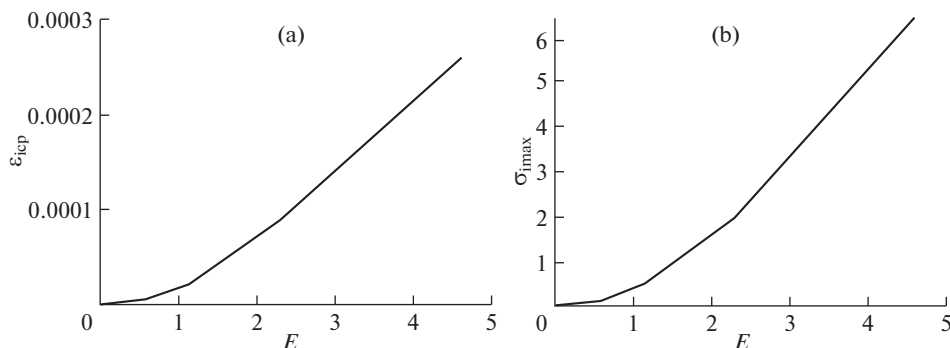


Рис. 6. Зависимости средней интенсивности деформаций ($\epsilon_{\text{ср}}$) (а) и максимальной интенсивности напряжений (σ_{imax} , МПа) (б) в композите “медь–графит” от напряженности электрического поля постоянного тока (E , В/м^5).

определяется напряженностью электрического поля. При увеличении напряженности в 10 раз количество выделяемого тепла увеличивается в 100 раз, что объясняет нелинейность связи между параметрами напряженно-деформированного состояния и напряженностью электрического поля.

5. Заключение. Разработанный подход, заключающийся в последовательном решении задач электропроводности, теплопроводности и термоупругости, позволяет определить поля электрического потенциала и напряженности, поле температуры, поля перемещений, деформаций и напряжений в композитах при протекании через них постоянного электрического тока. Учет в явном виде включений (их свойств, размеров, формы) позволяет оценить их влияние на параметры напряженно-деформированного состояния композита при прохождении через него электрического тока.

Анализ композитов двух видов с разными электрофизическими характеристиками фаз показывает, что значения напряжений и деформаций много выше в случае, когда обе фазы материала – матрица и включения – обладают проводимостью, т.е. не являются электроизоляторами. Это объясняется увеличением силы тока в этом случае и количеством выделенного тепла.

Показано, что если компоненты композита не обладают пьезоэффектом, то вследствие нагрева при протекании электрического тока в таком неоднородном материале с различными теплофизическими свойствами фаз возникают поля перемещений, деформаций и напряжений. В то же время, в пьезоматериалах, испытывающих воздействие электрического поля, возникают напряжения и деформации, не связанные с выделением тепла.

Показано, что параметры напряженно-деформированного состояния внутри композита растут быстрее, с увеличением напряженности электрического поля, т.е. для рассмотренных композитов эта связь является нелинейной.

Предложенная методика позволяет вычислить численные значения напряжений в композите при протекании через него электрического тока, и, при использовании соответствующего критерия прочности, оценить, насколько напряженное состояние композита близко к предельному (разрушению).

Моделирование композита при прохождении электрического тока позволяет вычислить параметры напряженно-деформированного состояния композита и оценить возможность потери прочности композита в результате электрического разогрева. Если в качественном плане можно определить характер влияния обсуждаемых факторов

на параметры НДС в композите, то предложенный и реализованный в работе подход позволяет сделать количественные оценки.

Благодарности. The work was performed according to the government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Skelhorn D.* Particulate fillers in elastomers. In: *Rothorn RN* (ed) Particulate-filled polymer composites. 2nd ed. Shrewsbury, UK: Rapra Tec. Lim., 2003. 324 p.
2. *Hohenberger W.* Fillers and reinforcements/coupling agents // *Plastics Additives Handbook*. 5th ed. Ed. by *H. Zweifel, R. D. Maier, M. Schiller*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001. P. 919–966.
3. *Masenelli-Varlot K., Chazeau L., Gauthier C., Bogner A., Cavaillé J.Y.* The relationship between the electrical and mechanical properties of polymer–nanotube nanocomposites and their microstructure // *Compos. Sci. Technol.* 2009. V. 69. P. 1533–1539.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.035>
4. *Hassan H.H., Nasr G.M. and El-Waily M.A.* Electrical and mechanical properties of aluminum-loaded NBR composites // *J. Elastomers Plastics*. 2013. V. 45. P. 121–141.
<https://doi.org/10.1177/0095244312462160>
5. *Grazioli D., Zadin V., Brandell D., Simone A.* Electrochemical-mechanical modeling of solid polymer electrolytes: Stress development and non-uniform electric current density in trench geometry microbatteries // *Electrochimica Acta*. 2019. V. 296. P. 1142–1162.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.146>
6. *Talin A.A., Ruzmetov D., Kolmakov A., McKelvey K., Ware N., Gabaly F. El, Dunn B., White H.S.* Fabrication, testing, and simulation of all-solid-state three-dimensional Li-Ion batteries // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 8. P. 32385–32391.
<https://doi.org/10.1021/acsami.6b12244>
7. *Wang X.-S., Tang H.-P., Li X.-D., Hua X.* Investigations on the mechanical properties of conducting polymer coating-substrate structures and their influencing factors. Review // *Int. J. Mol. Sci.* 2009. V. 10. P. 5257–5284.
<https://doi.org/10.3390/ijms10125257>
8. *Namsheer K., Rout C.S.* Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications // *RSC Adv.* 2021. V. 11. P. 5659–5697.
<https://doi.org/10.1039/d0ra07800j>
9. *Kim N., Lienemann S., Petsagkourakis I., Mengistie D.A., Kee S., Ederth T., Gueskine V., Leclère P., Lazzaroni R., Crispin X., Tybrandt K.* Elastic conducting polymer composites in thermoelectric modules // *Nat. Commun.* 2020. V. 11 (1). № 1424. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15135-w>
10. *Melling D., Jager E.W.H.* Conducting polymers as EAPs: characterization methods and metrics // *Electromechanically Active Polymers. Polymers and Polymeric. Composites: A Reference Series*. Springer, 2016. P. 319–351.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-31530-0_14
11. *Mohd Radzuan N.A., Sulong A.B., Sahari J.* A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017. V. 42 (14). № 6. P. 9262–9273.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.045>
12. *Plesse C., Vidal F., Randriamahazaka H., Teyssié D., Chevrot C.* Synthesis and characterization of conducting interpenetrating polymer networks for new actuators // *Polymer*. 2005. V. 46. P. 7771–7778.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.103>
13. *Fu P., Liu H., Chu X.* An efficient multiscale computational formulation for geometric nonlinear analysis of heterogeneous piezoelectric composite // *Compos. Struct.* 2017. 167. P. 191–206.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.005>
14. *Yaghmaie R., Ghosh S.* Computational modeling of finite deformation piezoelectric material behavior coupling transient electrical and mechanical fields // *J. Computat. Phys.* 2018. V. 373. P. 148–170.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.06.070>

15. Koh S.J.A., Zhou T., Li J., Zhao X., Hong W., Zhu J., Suo Z. Mechanisms of large actuation strain in dielectric elastomers // J. Polym. Sci. Part B. Polym. Phys. 2011. V. 49. P. 504–515.
16. Mota A., Zimmerman J.A. A variational, finite-deformation constitutive model for piezoelectric materials // Int. J. Numer. Methods Eng. 2011. V. 85 (6). P. 752–767.
17. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б. и др. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов вузов. В 3-х частях. М.: Энергия, 1979. Ч. 2, 3. 432 с.
18. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия, 1975. Т. 2. 407 с.
19. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 246 с.
20. Segerlind L. Applied Finite Element Analysis. N.Y.: John Wiley & Sons, 1976. = Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
21. Neto E.A.S., Peri'c D., Owen D.R.J. Computational methods for plasticity theory and applications. John Wiley & Sons Ltd., 2008. 816 p.
22. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th Ed. Butterworth-Heinemann, 2013. 752 p.
23. Гришаева Н.Ю., Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А., Реутов Ю.А., Матолыгина Н.Ю. Модификация теплофизических характеристик полимеров введением микронаполнителей // Мех. композиц. матер. констр. 2016. Т. 22. № 3. С. 342–361.
24. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Lyukshin B.A., Lyukshin P.A., Matolygina N.Yu., Panin S.V., Reutov Yu.A. A unified approach to determining the effective physicommechanical characteristics of filled polymer composites based on variational principles // Mech. Compos. Mater. 2019. V. 54. № 6. P. 775–788.
<https://doi.org/10.1007/s11029-019-9782-8>