ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА 2023, № 1, с. 142–155

УДК 536.2,537.31,539.3

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

П. А. Люкшин[a,*], Б. А. Люкшин[a,b,c,], С. В. Панин[a,d,***], С. А. Бочкарева[a,b,****]**

[a] *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*
[b] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*
[c] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*
[d] *Национальный 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 напряжении 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 нанонаполнителей, способно превратить их в композиты, обладающие рядом ценных физических и функциональных свойств.

Одним из наиболее популярных нанонаполнителей 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, обусловливающие 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-этилендиокситиофен)	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 · K)	2300	750	380
Плотность ρ, кг/м^3	1333	1750	8900
Коэффициент теплопроводности K, Вт/(м · K)	0.4	1.2	385
Удельная электрическая проводимость, Ом$^{-1}$ · м$^{-1}$	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]:

$$\operatorname{rot}\overline{E} = 0, \quad \overline{\delta} = \sigma \cdot \overline{\overline{E}}, \quad \operatorname{div}\overline{\delta} = 0 \tag{2.1}$$

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:

$$\bar{E} = -\mathrm{grad}\varphi$$

Подставляя ее в (2.1), получим уравнение Лапласа:

$$\mathrm{div}(-\sigma \cdot \mathrm{grad}\varphi) = 0 \tag{2.2}$$

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.

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

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

Электрический потенциал на границах AB 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]

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \sigma_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = \sigma_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial n}$$

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

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

Минимизация функционала позволяет получить систему алгебраических уравнений

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

или

$$[K]\{\varphi\} = \{F\} \tag{2.3}$$

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

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

$\{\varphi\}$ – 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

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

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

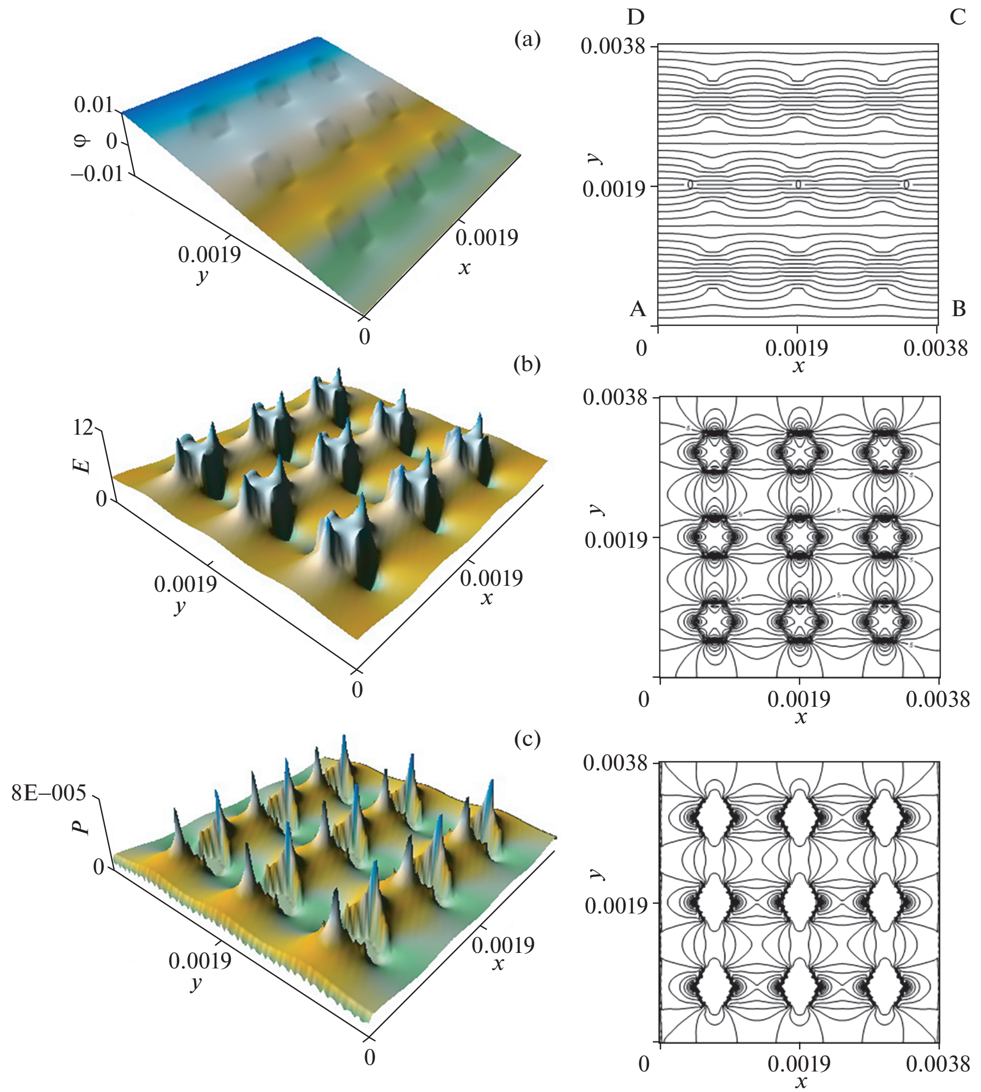

Рис. 1. Поверхности и изолинии для композита “медь–графит” в плоскости *xy* (м): (a) – скалярный электрический потенциал (φ, в); (b) – напряженность электрического поля (*E*, в/м); (c) – мощность тепловых потерь электрического поля постоянного тока (*P*, Вт).

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

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

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

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 композите “медь–графит” равна $P_{\mathrm{ABCD}} = 0.563$ Вт (рис. 1, c), а в композите “поли (3,4-этилендиокситиофен) – медный порошок” $P_{\mathrm{ABCD}} = 0.143 \times 10^{-4}$ Вт (рис. 2, c), т.е. различие составляет 4 порядка. На рис. 1, b и 2, b 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, a и 2, a).

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, K – коэффициент теплопроводности.

На кромках AB и DC задавалась температура (условия Дирихле)

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

На кромках 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

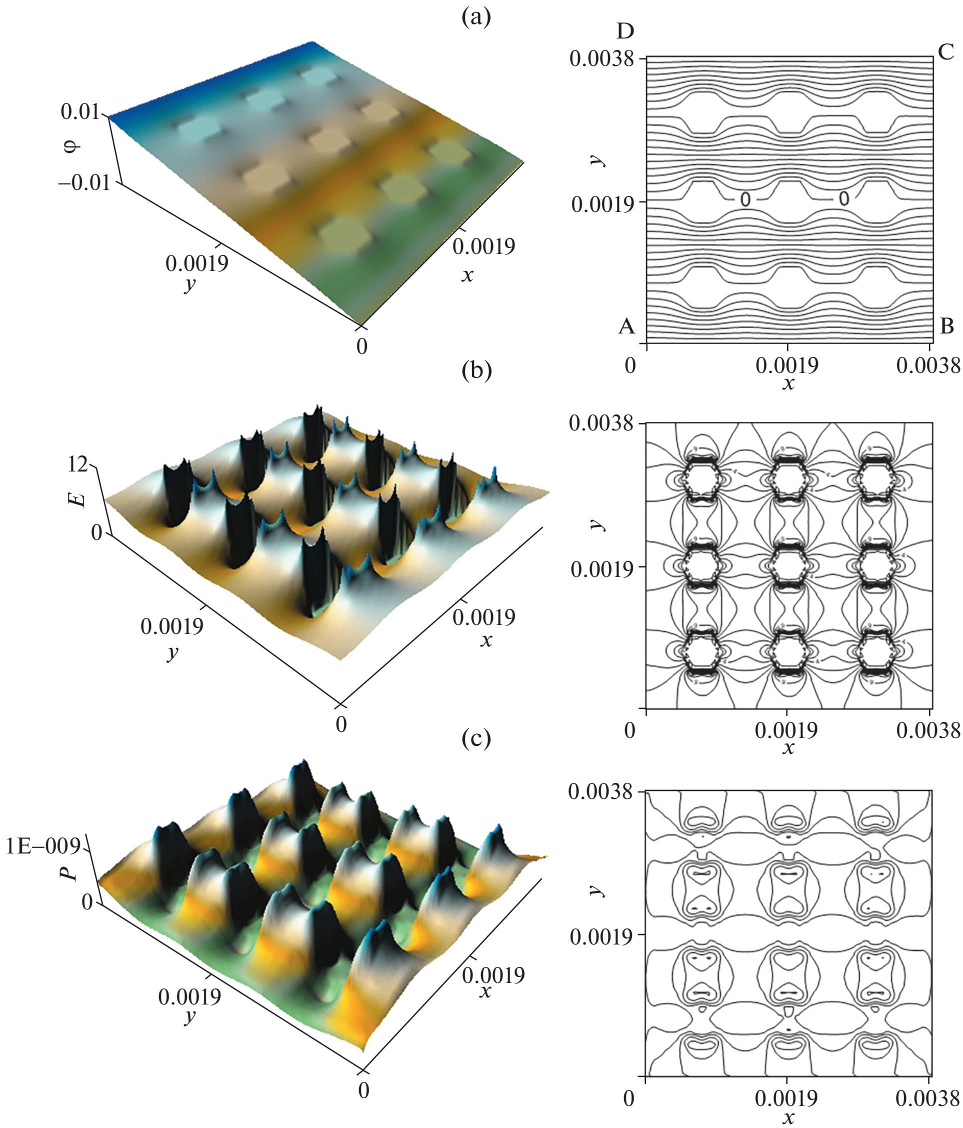

Рис. 2. Поверхности и изолинии для композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” в плоскости *xy* (м): (a) – скалярный электрический потенциал (φ, в); (b) – напряженность электрического поля (*E*, в/м); (c) – мощность тепловых потерь электрического поля постоянного тока (*P*, Вт).

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

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

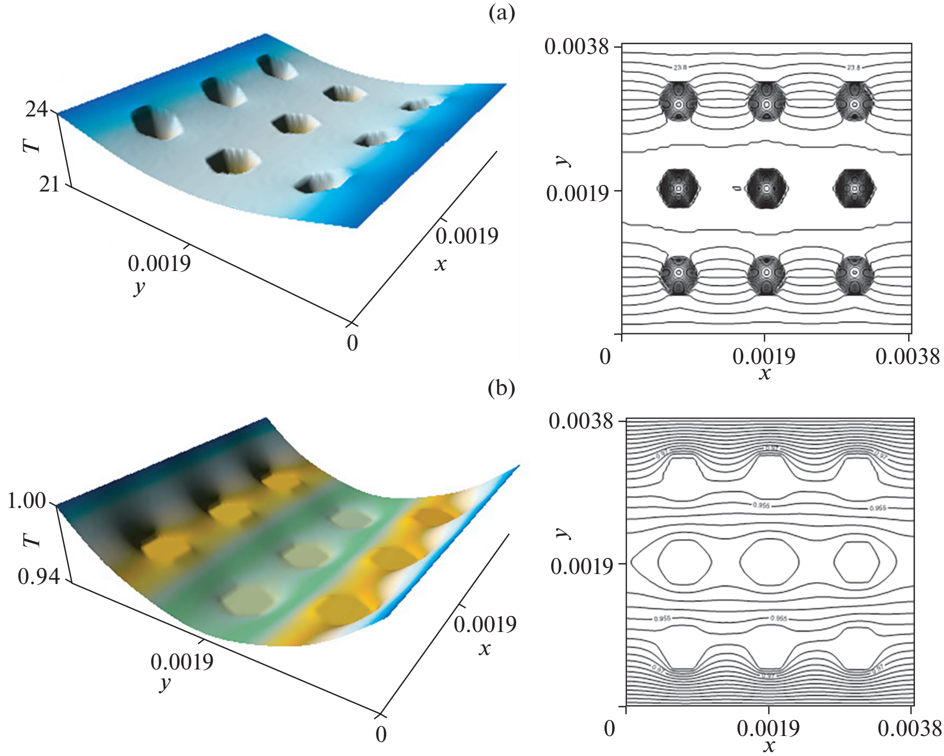

Рис. 3. Поверхности и изолинии распределения температуры (T, °C) в композитах в плоскости xy (м): a) “медь–графит”; b) “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок”.

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

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 $\{f^{(e)}\}$

$$\{F\} = \sum_{e}^{n}\{f^{(e)}\}$$

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

$$\{f^{(e)}\} = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T[D^{(e)}]\cdot\{\varepsilon_0\}\,dV$$

Вектор температурной деформации в случае плоского напряженного состояния равен

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

где ΔT – изменение температуры,

α – коэффициент линейного теплового расширения.

Закон Гука запишется в виде

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\})$$

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.

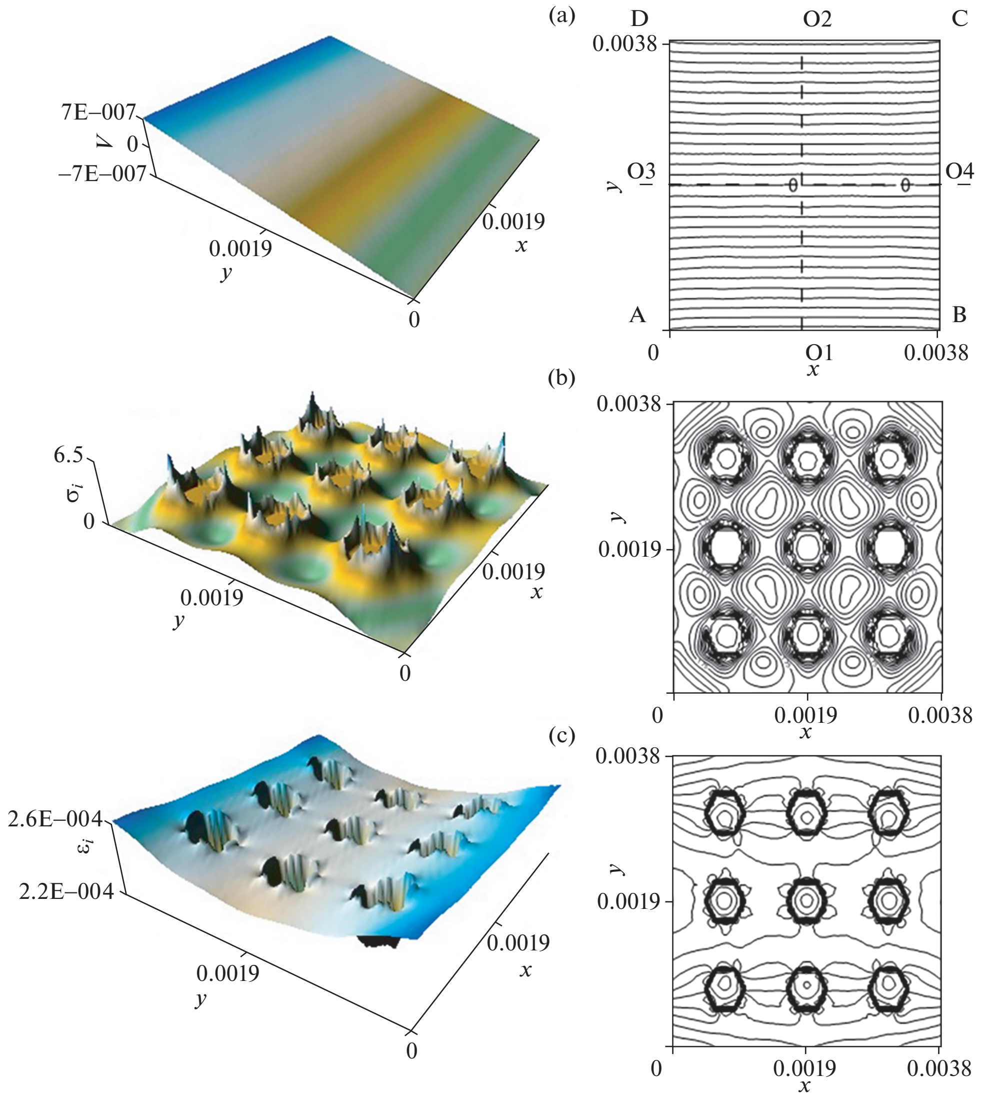

Рис. 4. Поверхности и изолинии в ячейке композита “медь–графит”: (a) – перемещения вдоль оси y (V, м); (b) – интенсивность напряжений (σ_i, МПа) в плоскости xy (м), (c) – интенсивность деформаций (ε_i).

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, a поле перемещений для композита “медь–графит” однородно, в отличии от поля перемещений для композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок” (рис. 5, a), 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.

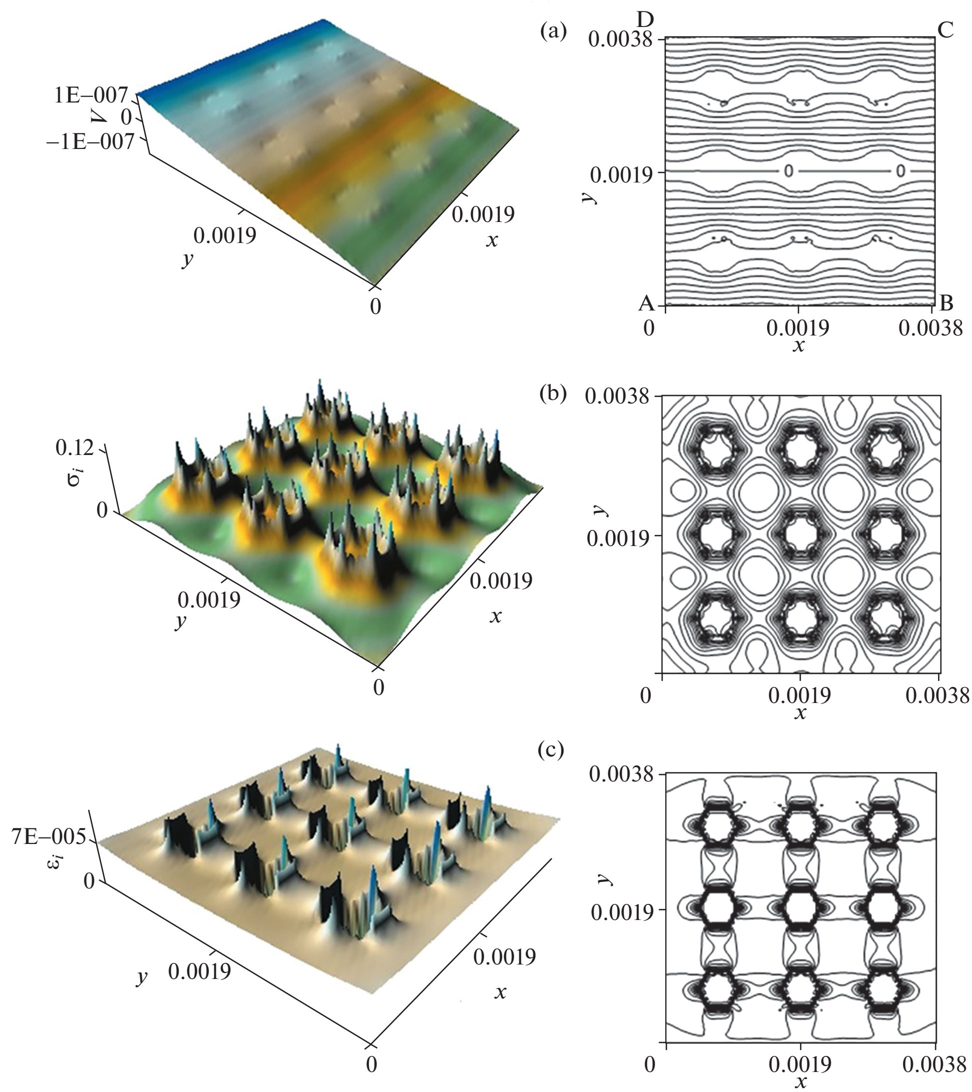

Рис. 5. Поверхности и изолинии в ячейке композита “поли(3,4-этилендиокситиофен)–медный порошок”: (a) – перемещения вдоль оси *y* (V, м); (b) – интенсивность напряжений (σ_i, МПа), (c) – интенсивность деформаций (ε_i).

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

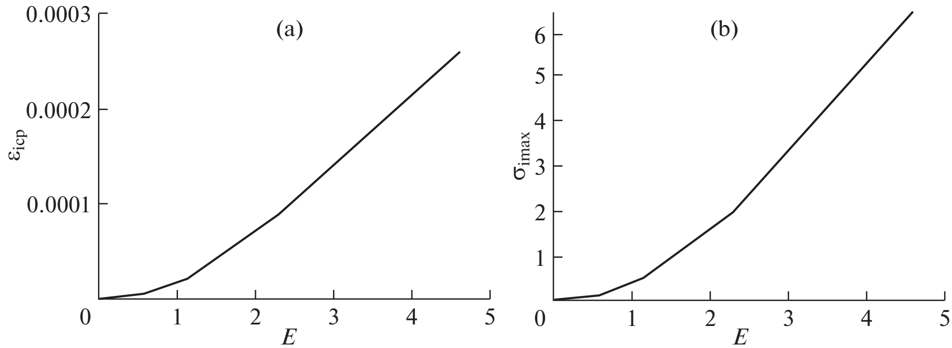

Рис. 6. Зависимости средней интенсивности деформаций (ε_{icp}) (a) и максимальной интенсивности напряжений (σ_{imax}, МПа) (b) в композите "медь–графит" от напряженности электрического поля постоянного тока (E, В/м^5).

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. Развитый 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-деформированное состояние 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: *Rothon 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 Fanser 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 втузов. 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 Willey & 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 physicomechanical 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