

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.075.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 30.06.2022 г, протокол № 31

О присуждении **Семенову Артему Семеновичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Многоуровневые модели сегнетоэлектродупругих материалов и их применение при решении краевых задач», по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите 24 марта 2022 г., диссертационным советом Д 002.075.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук Министерства образования и науки Российской Федерации, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации о создании диссертационного совета № 1902-1321 от 10.10.2008. Состав совета переутвержден приказом № 532/нк от 25.05.2022.

Соискатель Семенов Артем Семенович, 1966 года рождения, в 1996 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» на тему «Совершенствование методов исследования процессов термо-упруго-пластического деформирования на основе многомодельного анализа и точного интегрирования определяющих уравнений» в диссертационном, созданном на базе Санкт-Петербургского государственного технического

университета. В настоящий момент работает доцентом Высшей школы Механика и процессы управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Научный консультант отсутствует.

Официальные оппоненты:

Трусов Петр Валентинович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета, заслуженный деятель науки РФ дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

1. Сомневаюсь, что непосредственно из принципа максимума диссипации можно получить определяющее соотношение (см. стр. 9). Для этого надо сконструировать функцию диссипации, а это обычно делается «обратным ходом»: вначале определяется вид определяющего соотношения, по которому устанавливается функция, действием на которую тем или иным оператором (чаще всего – дифференцирования) можно получить искомое определяющее соотношение.
2. Можно ли об опытах, описанных на стр. 47-49, говорить, как о многоосных? Аналогичные опыты проводят по механическому нагружению предварительно текстурированных материалов (например, листовых материалов, полученных прокаткой): вырезаются образцы под различными углами по отношению к направлению прокатки, но при этом никто не говорит о многоосных испытаниях.
3. Введенные на стр. 113 операции осреднения требуют пояснений. Если рассматривать только механическую часть (соотношения (2.1), (2.2)), то для такого осреднения в общем случае не выполнится согласованность по энергии деформации (осредненная энергия не равна энергии осредненных

полей), дополнительно требуется либо однородность одного из этих полей, либо, по крайней мере, некоррелированность полей напряжений и деформаций, а обосновать ее едва ли возможно.

4. Каким образом предполагается определять такое значительное число параметров, входящих в соотношения конститутивных моделей (см. п. 2.1)?
5. В значительной части работы определяющие соотношения сегнетоэлектростатического упругого материала формулируются по аналогии с соотношениями теории пластического течения. Насколько оправдана такая аналогия с позиций физики? Все-таки физические механизмы индивидуальных атомарных перестроек и эволюции коллективных изменений дислокационных субструктур существенно отличаются.
6. Чем обусловлен выбор тестовых задач, представленных в п. 3.4? Как представляется, этот выбор должен быть связан с особенностями строения и предсказанного (из физических соображений, экспериментальных данных) вида решений для реальных задач, которые предполагается решать с использованием разработанного инструментария.

Наседкин Андрей Викторович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Математического моделирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

1. В диссертации используются в основном статические (квазистатические) постановки задач сегнетоэлектростатического упругости. Однако ряд процессов поляризации и работа многих пьезоэлектрических устройств происходят в динамическом режиме. В этой связи было бы интересно обсудить возможности обобщения предлагаемых подходов на динамические задачи.
2. Использование осреднения Рейсса требует какого-то обоснования, поскольку имеются многие другие альтернативные методы.

3. Изотропное приближение, несмотря на ссылки на работы, где оно использовалось, также требует обоснования, поскольку наличие анизотропных пьезоэлектрических свойств кажется нелогичным при использовании изотропных упругих и диэлектрических свойств.
4. При сравнении скалярно-потенциальной и векторно-потенциальной формулировок по сходимости в нелинейных задачах можно было бы вместо метода Ньютона-Рафсона использовать метод движения по дугам (arc-length method), что вполне вероятно могло бы нивелировать недостатки сходимости МКЭ в классической формулировке для задач электроупругости.
5. Электрические граничные условия при векторно-потенциальной формулировке представляются более сложными. Здесь было бы интересно обсудить типы функций формы, которые являются наиболее подходящими для удовлетворения этих граничных условий (вместе со сходимостью и вычислительной трудоемкостью).
6. Электрическое граничное условие для электродов, запитываемых генераторами тока (заряда), кажется, не рассмотрено. Это условие возможно мало используется для статических задач, но оно чрезвычайно важно для динамических задач, в частности для поиска частот электрических антирезонансов. Для распространения метода на динамические задачи было бы полезно проанализировать возможности использования этого условия при векторно-потенциальных формулировках.
7. Было бы полезным дать сравнение предлагаемой векторно-потенциальной формулировки с гибридным МКЭ, рассмотренном в цитируемой в диссертации работе Sparr H et al [415], также со смешанным МКЭ, представленном в работах A. Pechstein с соавторами.
8. Для практического использования было бы крайне полезно разработать какие инженерные (или стандартизированные) рекомендации по неоднородностям полей поляризации вблизи кромок электродов, в окрестности включений и т.п.

9. Для работы такого объема естественно, что имеются некоторые опечатки и неточности (на стр. 96 опущен множитель у диэлектрической проницаемости вакуума, а в (1.60) обычно используется знак минус; на стр. 109 указано на 10 констант, но потом говорится о $6+3+2$ константах; использование формулах терминов на кириллице (ЭПОП, ЭПОК) кажется, не совсем удачным; и т.п.).

Пронин Игорь Петрович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Физики сегнетоэлектричества и магнетизма Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

1. В работе отсутствуют комментарии о возможности применения предложенных микроструктурных моделей для описания поведения сегнетоэлектрических тонких пленок.
2. Для объяснения экстремальных свойств в области морфотропной фазовой границы в твердых растворах ЦТС используется модель для двухфазной системы, состоящей из смеси тетрагональной и ромбоэдрической фаз. При этом не учитываются экспериментальные данные и теоретические расчеты, в соответствии с которыми в узком интервале концентраций оказывается устойчивой промежуточная моноклинная фаза.
3. Полученные в работе результаты апробированы на конференциях, где в основном обсуждались проблемы механики твердого тела, но практически не представлялись на сегнетоэлектрических конференциях, как отечественных, так и междугородних.
4. Разработанные модели прошли верификацию на составах пьезокерамики (PZT-5H, PZT-4D и т.д.), производимых на «Западе». Результаты

верификации для отечественных видов пьезоакерамик (таких как ЦТСНВ-1, ЦТС-19, ПКР различных типов) в работе отсутствуют.

5. В автореферате отдельным пунктом отсутствуют выводы и заключение по работе, что несколько затрудняет восприятие содержательной части автореферата.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подготовленном Семеновым Борисом Николаевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, подписанном Морозовым Никитой Федоровичем, академик РАН, доктором физико-математических наук, профессором, заведующем кафедры теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, и утвержденном Микушевым Сергеем Владимировичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, проректором по научной работе, указали, что

в работе предложен новый многоуровневый подход для описания нелинейного поведения поликристаллических и монокристаллических сегнетоэлектрoупругих материалов с учетом эволюции и взаимодействия мультидоменной и дефектной подструктур, многофазного состава, анизотропии свойств и диссипативного характера движения доменных стенок.

Для решения нелинейных связанных электромеханических краевых задач впервые предложена векторно-потенциальная вариационная формулировка задачи сегнетоэлектрoупругости, лишенная недостатков стандартной скалярно-потенциальной вариационной формулировки.

Полученные с помощью разработанной модели новые результаты позволяют дать объяснение ряду принципиальных эффектов поведения рассматриваемого класса материалов: наличию экстремальных физико-

механических свойств вблизи морфотропной фазовой границы для двухфазной и трехфазной смесей, открывающее возможность синтеза сегнетоэлектрострунких материалов с оптимальной структурной организацией; эффектам доменного и кристаллитного упрочнения; эффектам смещения и среза петель диэлектрического и электромеханического гистерезисов, процессам старения.

Отмечается, что диссертация Семенова Артема Семеновича «Многоуровневые модели сегнетоэлектрострунких материалов и их применение при решении краевых задач» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела в части разработки подходов описания необратимых процессов деформирования и поляризации сегнетоэлектрострунких сред с учетом различных структурных уровней, многофазного состава и эволюции дефектов.

Работа является завершенным научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела и имеет важное научное значение и практические приложения.

Диссертационная работа Семенова А.С. отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела.

В отзыве ведущей организации заслушанном, обсужденном и одобренном на заседании кафедры теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета 06 июня 2022 года, имеются следующие замечания:

1. Предложенная модель сегнетоэлектрострункого материала не учитывает влияние температуры на процессы переключения в сегнетоэлектрострунких

материалах. Влияет ли это предположение (упрощение) на точность результатов?

2. При формулировке микроструктурной модели рассмотрение ограничено только тремя классами симметрии кристаллических решеток: тетрагональной, ромбоэдрической и орторомбической. Отсутствует объяснение отказа от рассмотрения остальных 4 из 7 вариантов кристаллографических систем (сингоний).
3. Автор ограничился рассмотрением линейной теории дефектов с использованием свободной энергии дефектов в виде квадратичной формы от внутренних переменных, характеризующих дефектное состояние. Насколько обоснован отказ от рассмотрения нелинейных моделей эволюции дефектов?
4. Выбор граничных условий для векторного потенциала (см., например, Табл. 3.2 или (3.25)) является нетривиальным. Существует ли теоретическое обоснование возможности использования подобных вариантов граничных условий?
5. В предлагаемой модели автор учитывает релаксационные процессы, связанные с перестройкой структуры пьезоэлектриков, привлекая сугубо нелинейные кинетические уравнения, что вместе с нелинейным процессом деформирования приводит к новой краевой задаче. Сравнение решений этой же задачи с решением задачи в классической постановке у автора отсутствует, хотя очевидно, что учет выше указанных факторов должен начинаться с определенных значений параметров пьезоэлектрика и внешних воздействий.
6. В работе правильно подчеркивается принципиальная роль процессов релаксации. Основной же характеристикой любого релаксационного процесса является характерное время релаксации, часто выступающее в качестве важнейшего инварианта. Однако в диссертации количественная оценка этого параметра в большинстве случаев отсутствует.

Соискатель имеет 161 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 45 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и/или входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus опубликовано 16 работ, в том числе 5 в журналах Q1.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Семенов А.С. Микроструктурная модель сегнетоэлектрoупругого материала с учетом эволюции дефектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 32-57.
2. Семенов А.С. Микромеханическая модель поликристаллического сегнетоэлектрoупругого материала с учетом дефектов // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60, № 6. – С. 173-191.
3. Lobanov S.M., Semenov A.S. Finite-element modeling of ferroelectric material behavior at morphotropic phase boundaries between tetragonal, rhombohedral and orthorhombic phases // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1236, – P. 012062.
4. Semenov A., Trapp J., Nöthe M., Eberhardt O., Kieback B., Wallmersperger T. Thermo-electro-mechanical modeling of spark plasma sintering processes accounting for grain boundary diffusion and surface diffusion // Computational mechanics. – 2021. – Vol. 67. – P. 401-416.
5. Семенов А.С., Лобанов С.М. Моделирование нелинейного поведения сегнетоэлектрoупругих материалов при циклическом нагружении // Журнал технической физики. – 2018, – Т. 88, № 10. – С. 1526-1532.
6. Lobanov S.M., Semenov A.S. Modeling of nonlinear behavior of polycrystalline lead-free piezoceramics with a content of tetragonal, rhombohedral and orthorhombic phases under cyclic loading // Procedia Structural Integrity. – 2017. – Vol. 6. – P. 90–94.
7. Semenov A., Melnikov B. Interactive rheological modeling in elasto-visco-plastic finite element analysis // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 165. – P. 1748-1756.

8. Semenov A.S., Trapp J., Nöthe M., Eberhardt O., Wallmersperger T., Kieback B. Experimental and numerical analysis of the initial stage of field-assisted sintering // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 52, № 3. – P. 1486-1500.
9. Stark S., Semenov A.S., Balke H. On the boundary conditions for the vector potential formulation in electrostatics // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2015. – Vol. 102, No. 11. – P. 1704-1732.
10. Ивашов И.В., Семенов А.С. Влияние граничных условий на берегах трещины на процесс разрушения поликристаллической пьезокерамики // *Инженерно-строительный журнал*. – 2014. Т. 51, № 7. – С. 5-15.
11. Semenov A.S., Liskowsky A.C., Neumeister P., Balke H. Effective computational methods for the modeling of ferroelectroelastic hysteresis behavior // *Proc. IUTAM «Multiscale Modelling of Fatigue, Damage and Fracture in Smart Materials Systems»*, M. Kuna (Ed.). IUTAM Bookseries. – 2011. – Vol. 24. – P. 43-53.
12. Roth S., Neumeister P., Semenov A.S., Balke H. Finite element simulation of the non-remanent straining ferroelectric material behavior based on the electro-static scalar potential – Convergence and stability // *Proc. IUTAM «Multiscale Modelling of Fatigue, Damage and Fracture in Smart Materials Systems»*, IUTAM Bookseries. M. Kuna (Ed.). – 2011. – Vol. 24. – P. 55-66.
13. Осипова Н.Г., Семенов А.С. Моделирование нелинейного поведения пьезокерамики тетрагональной структуры на основе методов конечно-элементной гомогенизации // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2011. – Т. 134, №4. – С. 56-64.
14. Semenov A.S., Liskowsky A.C., Balke H. Return mapping algorithms and consistent tangent operators in ferroelectroelasticity // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2010. – Vol. 81. – P. 1298–1340.
15. Semenov A.S., Liskowsky A., Balke H. Vector potential formulation for the three-dimensional finite element analysis of nonlinear electromechanical problems // *Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials*. Ed. M.J. Dapino. *Proceeding of SPIE*. – 2007. – Vol. 6526. – P. 65260A1-65260A12.

16. Semenov A.S., Kessler H., Liskowsky A., Balke H. On a vector potential formulation for 3D electromechanical finite element analysis // Communications in Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 22. – P. 357-375.

Материалы диссертации рассматривались на 47 международных и всероссийских конференциях.

На автореферат поступило 6 отзывов (все положительные):

1. Отзыв заведующего кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктора физико-математических наук, доцента Маслова Леонида Борисовича с замечанием:

– Рисунок 3 на стр. 18 демонстрирует значительное преимущество в точности решения у векторно-потенциальной формулировки, однако следует отметить, что при использовании векторно-потенциальной формулировки в каждом узле конечно-элементной модели имеется 6 степеней свободы, в то время как у скалярно-потенциальной формулировки всего лишь 4, что может приводить к выигрышу во времени счета для последнего варианта.

2. Отзыв профессора кафедры «Информационные системы и вычислительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», доктора физико-математических наук, профессора Бригаднова Игоря Альбертовича с замечанием:

– Анализ выражения уравнения эволюции (19) показывает, что введенные в нем константы материала не являются независимыми. Очевидно, что вместо трех констант $B^{J \rightarrow I}$, $G_c^{J \rightarrow I}$, C_0 может быть введена одна.

3. Отзыв заведующего кафедрой «Механика и прочность материалов и конструкций», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет

путей сообщения Императора Александра I», д.т.н., профессора Видюшенкова Сергея Александровича с замечанием:

– В тексте автореферата автор ограничился показом результатов верификации только для микроструктурной модели, не приводя аналогичных результатов для феноменологической модели.

4. Отзыв начальника управления организации научной деятельности, АО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", д.т.н. Глаговского Вячеслава Борисовича с замечанием:

– При описании гистерезисных явлений на практике широкое распространение получила модель Прайзаха, однако ее упоминание и сравнение с ней предложенных вариантов определяющих уравнений в автореферате отсутствует.

5. Отзыв начальника лаборатории Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт», «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «ПРОМЕТЕЙ» имени И.В. Горынина, д.т.н., Петров Сергей Николаевич с замечанием:

– В автореферате не представлены основные выводы диссертационного исследования.

6. Отзыв начальника отдела «Математического моделирования и САПР ГТД» ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, д.т.н., профессора Темиса Юрия Моисеевича с замечаниями и вопросами:

– Автор получил все определяющие соотношения в предположении об изотермичности. Представляет интерес оценка влияния температурных градиентов на определяющие соотношения модели.

– В соотношениях (1-3) и (4-6) автореферата применена методика усреднения по представительным объемам. Однако, из автореферата не ясно, как были выбраны объемы в численной реализации и одинаковы ли они при усреднении параметров упругого поля и электрического поля.

– При проведении экспериментальных исследований проводилась вырезка образцов из первоначально поляризованного материала. Не влияла ли механическая обработка на результаты эксперимента?

Ответы на замечания в отзывах на автореферат даны в ходе защиты.

Во всех отзывах указывается, что автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они представляют собой признанных компетентных действующих специалистов в области механики деформируемого твердого тела, имеющих научные публикации в областях науки, затрагиваемых диссертацией, способных определить научную и практическую ценность диссертационной работы.

По результатам защиты диссертационный совет отмечает, что основные научные результаты, полученные соискателем, заключаются в следующем:

1. **Предложен** *подход многоуровневого моделирования* нелинейного поведения сегнетоэластичных сред, учитывающий особенности деформирования и поляризации на различных структурных уровнях и позволяющий повысить точность определения напряженно-деформированного состояния.
2. **Разработана** *микроструктурная модель сегнетоэластичного материала* с учетом мультидоменной структуры, многофазного состава, анизотропии свойств доменов, наличия и эволюции полярных точечных дефектов для описания гистерезисного поведения сегнетоэлектриков/сегнетоэластиков в условиях сложного многоосного комбинированного электрического и/или механического нагружения.
3. **Предложена** *линейная теория эволюции точечных дефектов* в сегнетоэластичных материалах на основе выбора свободной энергии дефектов в виде квадратичной формы вектора поляризации и тензора

деформации дефектов, уравнения эволюции которых удовлетворяют диссипативному неравенству.

4. Впервые **предложена** *векторно-потенциальная вариационная формулировка* задачи сегнетоэластичности, соответствующая принципу виртуальной электромеханической работы, приводящая к положительно определенной матрице жесткости и обеспечивающая сходимость итерационных решений нелинейных краевых задач во всем диапазоне нагрузок. Для обеспечения единственности векторного потенциала наряду с калибровкой в объеме предложены и апробированы специальные виды граничных условий для односвязных и многосвязных областей.
5. **Разработан** *метод возвратного отображения* для интегрирования нелинейных дифференциально-алгебраических определяющих уравнений сегнетоэластичного материала эволюционного типа при наличии ограничений. Получена матрица согласованных касательных модулей для обеспечения квадратичной скорости асимптотической сходимости глобальной итерационной процедуры Ньютона-Рафсона.
6. Впервые **предложено** количественное описание эффекта *экстремальных свойств* вблизи *морфотропной фазовой границы* для двухфазной тетрагональной / ромбоэдрической и трехфазной тетрагональной / ромбоэдрической / орторомбической смесей, открывающее возможность синтеза сегнетоэластичных материалов с оптимальной структурной организацией.
7. **Предложено** математическое описание *явлений смещения и среза петель* диэлектрического и электромеханического гистерезисов на основе разработанной микроструктурной модели материала с учетом полярных точечных дефектов. Получены результаты исследования влияния ориентации дефектов на форму петель гистерезиса.
8. **Предложено** объяснение и количественное описание эффектов: микроструктурного (доменного и кристаллитного) упрочнения, наличия максимума в зависимости остаточной деформации тетрагонального и

ромбоэдрического поликристалла от спонтанной деформации, процесса старения после предварительной поляризации, деэйджинга, связанного с уменьшением начального поля смещения при последующем интенсивном циклическом нагружении.

Теоретическая значимость состоит в развитии комплексного подхода к построению многоуровневых моделей прогнозирования нелинейного поведения сегнетоэлектростроупругих материалов при произвольных программах сложного многоосного комбинированного электрического и/или механического нагружения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанные инструменты исследования (многоуровневые модели, методы решения нелинейных краевых связанных задач и реализующий их комплекс *программ*) могут быть использованы для анализа поведения сегнетоэлектростроупругих материалов в качестве рабочих элементов сенсоров и актуаторов при комбинированном электромеханическом воздействии. Получены аналитические и численные решения для ряда актуальных для практики краевых задач. Предложенная микроструктурная модель позволяет определить концентрационные границы оптимального состава, обеспечивающие экстремальные деформационные способности многосвязной смеси, что приводит к сокращению объема экспериментов.

В диссертации **проведена** всесторонняя *верификация* предложенных моделей материала, вариационных формулировок, способов задания граничных условий, методов решения нелинейных задач на основе сравнения полученных результатов с аналитическими решениями и результатами экспериментов. Произведено исследование скорости сходимости численного решения, диапазонов допустимых значений штрафных параметров. **Предложены методы идентификации** констант разработанных моделей сегнетоэлектростроупругого материала.

Установлен механизм возникновения в поликристалле микронапряжений вследствие наличия у кристаллитов запирающих (необратимо недеформируемых)

направлений, приводящих к парадоксальному снижению уровня остаточной деформации поликристалла с ростом спонтанной деформации. Систематический анализ взаимного влияния структурных элементов на различных масштабных уровнях позволил установить эффекты доменного и кристаллитного *упрочнения*.

Разработана феноменологическая модель склерономного сегнетоэластичного материала с уравнениями эволюции внутренних переменных, получаемыми следствием *принципа максимума диссипации* при наличии ограничения в виде функции переключения. **Произведена** конкретизация выражений для свободной энергии и функции переключения для *изотропного* и *трансверсально-изотропного* приближений в рамках теории инвариантов. Идентификация свободной энергии и функции переключения произведена на основе гомогенизации результатов расчетов с использованием микроструктурной модели.

Для верификации предложенных формулировок, способов задания граничных условий, методов решения нелинейных задач **получены** оригинальные *аналитические решения* линейных и нелинейных краевых задач сегнетоэластичности в трехмерной постановке.

Личный вклад: соискателем предложен новый метод моделирования поведения сегнетоэластичных материалов с изменяющейся доменной и дефектной микроструктурой, предложены математические формулировки определяющих уравнений, вариационные уравнения, постановки нелинейных краевых задач, выбраны методы исследования, на основе которых самостоятельно получены все основные результаты работы.

Диссертационная работа Семенова Артема Семеновича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики деформируемого твердого тела, посвященное созданию научно обоснованной методологии и построению на ее основе математических моделей сегнетоэластичных сред с учетом особенностей процессов необратимого

деформирования и поляризации на различных структурных уровнях. По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела. Работа полностью соответствует требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

На заседании 30 июня 2022 г. диссертационный совет принял решение (протокол №31) за создание многоуровневого подхода прогнозирования нелинейного поведения поликристаллических и монокристаллических сегнетоэластичных материалов с учетом эволюции и взаимодействия мультидоменной и дефектной подструктур, многофазного состава, анизотропии свойств и диссипативного характера движения доменных стенок, а также за разработку эффективных методов решения нелинейных связанных краевых задач сегнетоэластичности **присудить** Семенову Артему Семеновичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение ученой степени - 16, против присуждения ученой степени - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Директор ИПМаш РАН,
заместитель председателя
диссертационного совета Д 002.075.01,
д.т.н.



Полянский
Владимир Анатольевич

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.075.01,
д.т.н.

Седакова
Елена Борисовна

30 июня 2022 г.