

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.508.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ
МЕХАНИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» МИНИСТЕРСТВА
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «29» декабря 2025 г. № 12

О присуждении Устенко Анастасии Дмитриевны, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Теоретическое и экспериментальное исследование некоторых классов механических метаматериалов с сетчатой структурой» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите «29» декабря 2025 г., протокол заседания № 12 диссертационным советом 24.1.508.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 125040, г. Москва, Ленинградский просп., д. 7, стр. 1, приказ о создании диссертационного совета 24.1.508.01 – № 2144/нк от «27» ноября 2023 г.

Соискатель Устенко Анастасия Дмитриевна, 2 июля 1992 года рождения, в 2015 г. году окончила специалитет федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 105301 «Динамика и прочность машин». Диплом об окончании специалитета серия 107724 № 0896250, выдан 1 марта 2015 г. С 1 сентября 2020 г. и по 2019 г. соискатель проходила обучение в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Прикладной Механики Российской Академии Наук» (ИПРИМ РАН)

по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика» по специальности 01.02.04 «Механика деформированного твердого тела».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении науки «Институт Прикладной Механики Российской Академии Наук» (ИПРИМ РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации на базе лаборатории «Неклассические модели механики композиционных конструкционных материалов и конструкций».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, **Соляев Юрий Олегович**, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной механики Российской академии наук, профессор кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно – ракетных и космических изделий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ, по совместительству.

Официальные оппоненты:

Шоркин Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика и математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл.

Романов Александр Вячеславович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник кафедры механика композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук» (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве,

подписанном доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником, руководителем лаборатории «Математические методы механики материалов» **Фрейдиным Александром Борисовичем** и утвержденным доктором технических наук, директором ФГБУН ИПМаш РАН **Полянским Владимиром Анатольевичем**, указала, что диссертация Устенко Анастасия Дмитриевна представляет собой законченное научное исследование и по своей актуальности, научной новизне, уровню выполнения, объему, научной и практической значимости полученных результатов полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Устенко Анастасии Дмитриевны достойна присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Соискатель имеет 5 публикаций^(a) в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, три из которых уровня WoS Q1, а также в 6 публикациях^(b) в виде тезисов докладов на конференциях, семинарах, в том числе международных:

- 1^(a). Solyaev Y. O., **Ustenko A. D.** et al. Improved mechanical performance of quasi-cubic lattice metamaterials with asymmetric joints //Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 14846
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-41614-3>
WoS, Scopus, Q1
- 2^(a). Solyaev Y., **Ustenko A.** et al. Static and dynamic response of sandwich beams with lattice and pantographic cores //Journal of Sandwich Structures & Materials. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 1076-1098
<https://doi.org/10.1177/10996362211033>
WoS, Scopus, Q1
- 3^(a). Solyaev Y., Lurie S., **Ustenko A.** Apparent bending and tensile stiffness of lattice beams with triangular and diamond structure //Developments and Novel Approaches in Biomechanics and Metamaterials. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – С. 431-442
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50464-9_25
Глава в книге, Scopus, Q4
- 4^(a). Solyaev Y., Lurie S., **Ustenko A.** Numerical modeling of a composite auxetic metamaterials using micro-dilatation theory //Continuum Mechanics and

Thermodynamics. – 2019. – Т. 31. – №. 4. – С. 1099-1107
<https://doi.org/10.1007/s00161-018-0730-y>
 WoS, Scopus, Q2

- 5^(a). Lurie S. A., Solyev Y. O., **Ustenko A. D.** et al. Continuum micro-dilatation modeling of auxetic metamaterials //International Journal of Solids and Structures. – 2018. – Т. 132. – С. 188-200
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.09.022>
 WoS, Scopus, Q1
- 6^(b). **Устенко А. Д.**, Соляев Ю. О. ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИИ ЯЧЕЕК ПЕРИОДИЧНОСТИ НА СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ //XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – 2023. – С. 1022-1023.
- 7^(b). **Ustenko A.**, Solyaev Y. EXCEPTIONAL IMPACT STRENGTH OF SANDWICH BEAMS WITH PANTOGRAPHIC-TYPE METAMATERIALS IN THE CORE// Workshop of the IRP Coss&Vita Advances in ELAstoDYNamics. – 2021. – С. 36.
- 8^(b). **Устенко А. Д.**, Соляев Ю. О. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МЕТАМАТЕРИАЛА С НЕЛОКАЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ СВЯЗЯМИ //Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. – 2020. – С. 212-214.
 DOI: [10.33113/conf.mkmk.ras.2020.212_214.32](https://doi.org/10.33113/conf.mkmk.ras.2020.212_214.32)
- 9^(b). **Ustenko A.**, Solyaev Y., Lurie S. APPARENT ELASTIC PROPERTIES OF LATTICE BEAMS SECOND GRADIENT SURFACE ELASTICITY HOMOGENIZATION //Workshop of the IConSom2019 International Conference on Nonlinear Solid Mechanics. – 2019. – С. 313.
- 10^(b). **Устенко А. Д.** ВАРИАНТ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА-АУКСЕТИКА, ДЕМОНСТРИРУЮЩЕГО СУЩЕСТВЕННЫЕ НЕЛОКАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ //Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. – 2019. – С. 99-100.
- 11^(b). **Устенко А. Д.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРО-ДИЛАТАЦИОННОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА // В книге: XLIII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Материалы Международной молодежной научной конференции. – 2017. С. 79-80.

В этих и остальных работах изложены и обоснованы основные результаты автора по теоретическому и экспериментальному исследованию.

На диссертацию и автореферат поступили **отзывы:**

от научного руководителя, ведущей организации и официальных оппонентов, отзывы положительные;

от Манько Артура Владимировича, кандидата технических наук, доцента кафедры «Механика грунтов и Геотехники» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», отзыв положительный;

от Швейкина Алексея Игоревича, доктора физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», отзыв положительный;

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены актуальность, новизна, достоверность полученных автором результатов и их практическая значимость.

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве **ведущей организации** – ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук» - имеются следующие замечание:

1. В третьей и четвертой главах диссертации в явном виде не представлено обоснование выбора критерия прочности для проведения динамических расчетов. Применяемый критерий (относительно первого инварианта тензора напряжений) является достаточно специфическим и его выбор, вместо, например, более общепринятых критериев по максимальным эквивалентным пластическим деформациям или по максимальным главным напряжениям было бы желательно обосновать на демонстрационных примерах и в сопоставлении с экспериментальными данными;

2. В первой и второй главах диссертации анализ моделей и идентификация параметров представлена для выбранного конкретного значения размера ячейки периодичности. Было бы интересно дать оценки получаемых значений неклассических констант и возможность применения рассматриваемых обобщенных моделей для структур с разным размером ячеек периодичности;
3. Связь первых двух глав с третьей и четвертой главой диссертации объясняется поиском структур метаматериалов, в которых идентифицируемые масштабные параметры были бы достаточно велики и превосходили характерные размеры ячеек периодичности. В связи с этим было бы интересно представить пример такой идентификации масштабных параметров для пантографических структур, для которых показаны наилучшие эффекты в повышении прочности в условиях удара в третьей главе диссертации;
4. В автореферате на странице 10 неточно определены статические граничные условия, а именно условия по моментам высшего порядка.

Замечания в отзыве **официального оппонента Шоркина В.С.:**

1. Информация об апробации работы в автореферате и в диссертации представлена по-разному. В автореферате дан список семинаров и конференций, но не указан список публикаций автора по теме диссертации. В диссертации этот список представлен;
2. В списке литературы источник 7. «Кунин И.А. (1975) Теория упругих тел с микроструктурой...» оформлен не по стандарту.
3. Во введении, изложенном в тексте диссертации, ее автор изложил суть задач, которые необходимо решить для достижения ее цели, в то время как в автореферате эти цели не указаны;
4. Во введении можно было больше уделить внимания работам (например, Гольштейна Р.В.) по изучению естественных материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона;
5. Автор не рассматривает вопрос об однозначности выбора континуальной модели для описания того или иного эффекта. Было бы уместно обосновать,

почему именно микро-дилатационная и градиентная модели, а не какие-то другие (например, микрополярная) выбраны для исследования в данной работе, связав это с архитектуры ячейки периодичности.

Замечания в отзыве **официального оппонента Романова А.В.:**

1. К общим замечаниям по оформлению диссертации и автореферата можно отнести часто встречающиеся орфографические неточности с неправильным склонением или окончанием слов в предложениях; наличие наименований параметров, их размерностей, надписей к графикам и рисункам на английском языке вместо русского;
2. Во введении в первом абзаце есть такое, на мой взгляд, не чётко сформулированное предложение: «В рамках классической теории упругости, которая исходит из представления, что среда является континуумом материальных точек, становится труднодостижимым описание механического поведения некоторых материалов со сложной микроструктурой». Хочется задать вопрос автору, не континуальную ли теорию он использует для уточнённого описания функциональных материалов?
3. В первом пункте положений, выносимых на защиту, в последнем предложении утверждается, что «проведена идентификация всех неклассических параметров метаматериала-ауксетика со взаимопроникающей структурой, в рамках-микро-дилатационной теории упругости». Здесь следовало бы уточнить, какие именно параметры идентифицированы, и при каких видах анизотропии? Из текста диссертации и автореферата ясно, что только для изотропных материалов.
4. Следующее предложение о теоретической значимости: «На основе численного моделирования процессов динамического деформирования и разрушения сетчатых метаматериалов, дано обоснование возможности повышения их ударной прочности за счёт использования асимметричных ячеек периодичности», следовало бы отнести к практической значимости, или дать пояснение.

5. В разделе 1.1 представлена общая постановка в рамках микро-дилатационной теории и даны выражения удельной энергии, кинематических и определяющих соотношений, уравнений равновесия и их граничных условия. Однако в самой диссертации нигде не представлено решения какой-либо конкретной краевой задачи микро-дилатационной теории упругости.
6. В разделе 1.1 во втором абзаце даны ограничения на допустимые значения материальных констант для среды с кубической симметрией, см. формулу (1.2). Но данные ограничения относятся к изотропному материалу. Это становится очевидным, если в выражении компонент материального тензора изотропной среды подставить соответствующие индексы:

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad C_{1111} = \lambda + 2\mu, \quad C_{1122} = \lambda, \quad C_{1212} = \mu,$$

$$\frac{C_{1111} - C_{1122}}{2} = C_{1212} \iff \frac{\lambda + 2\mu - \lambda}{2} = \mu.$$

7. В этом же разделе также следовало указать выражения компонент материальных тензоров 4 ранга для изотропной среды и для среды с кубической симметрией. В таком случае записи выражений удельной энергии и определяющих соотношений в формулах (1.1), (1.3), (1.12), (1.14) стали бы более очевидны и понятны с механической точки зрения.
8. В формулах (1.4), (1.5), (1.7), (1.9) впервые вводятся параметры «p, h, g» но нигде нет пояснений к ним.
9. Формула (1.4) записана математически некорректно т.к. в левой части указан скаляр, а в правой части дано выражение градиента, с «i-ой» компонентной вектора:

$$h = \alpha \phi_{,i} \quad (1.4)$$

В формулах (2.2) первые два выражения определяющих соотношений также записаны математически некорректно. А именно, левые части этих равенств содержат немые индексы, по которым происходит суммирование в правых частях равенств:

$$\sigma_{ij}^{\text{cauchy}} = C_{ijkl} \varepsilon_{ij}, \quad \mu_{ijk} = C_{ijklmn} \varepsilon_{ij,k}, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{\text{cauchy}} - \mu_{ijk,k} \quad (2.2)$$

10. Описание размерных эффектов в задачах деформации сетчатых балок и идентификация масштабных параметров градиентной теории упругости выполнено в рамках одноосного напряжённого состояния обобщённой моделью Эйлера-Бернулли в разделе 2.5. Однако в разделе 1.4 эффективные характеристики определялись балочными элементами Тимошенко. Чем мотивирован такой выбор разных моделей? Если характерный размер сечения более чем на порядок меньше линейного размера стержня, то применение модели Эйлера-Бернулли вполне оправдано.
11. В разделе 3.2 вводится понятие связи заполнителя между стержнями их разных наборов. Например, вводится описание связи «Variant 2» (как классического элемента планетографической структуры) в виде шарнирного соединения с отверстием Ø3.2мм в зонах пересечения стержней сечением 4x4мм² (для каждого стержня). Получается, что несущее сечение каждого стержня всего 4x0.8мм²? Насколько оправдано такое ослабление сечения?
12. В разделе 3.4 экспериментальные результаты динамических испытаний сендвич балок различных типов заполнителя сравнились с конечно-элементными моделями. При этом выбраны линейные тетраэдральные конечные элементы (также как и в разделе 4.6), которые имеют известные недостатки. Выполнялась ли оценка сходимости / корректности результатов расчёта, например, варьированием плотности сетки или сравнением с изопараметрическими конечными элементами, или элементами высшего порядка?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высокопрофессиональными специалистами в данной области и имеют публикации, связанные с направлением исследований диссертации, а в ведущей

организации работают специалисты, достижения которых широко известны, в том числе и в области науки, соответствующей тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

проведена идентификация всех неклассических параметров микродилатационной теории упругости на примере сетчатого метаматериала-ауксетика;

показано, что тип ячеек периодичности (треугольный/ромбовидный) существенным образом влияет на характер неклассических масштабных эффектов, реализующихся при изгибе балок с сетчатой структурой, что требует привлечения соответствующих моделей градиентной теории упругости;

предложен и реализован метод повышения ударной прочности сэндвич балок с сетчатыми заполнителями, основанный на использовании идеи пантографических метаматериалов и создании асимметричных связей между элементами, образующими ячейки периодичности. Повышение прочности достигается за счет изменения характера напряженно-деформированного состояния в ячейках периодичности и нелокального отклика метаматериала, масштабный параметр которого существенно превышает размер ячейки периодичности;

новые понятия не вводились.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритма и обосновании подходов к идентификации неклассических параметров моделей обобщённых континуумов, привлекаемых для описания эффективных характеристик упругих характеристик сетчатых метаматериалов. **Практическая значимость** работы состоит в формулировке инженерной методики повышения ударной прочности сетчатых метаматериалов на основе введения асимметрии связей в ячейке периодичности. Результаты численного моделирования динамических экспериментов показали, что такая модификация рассматриваемого метаматериала, связанная с асимметрией, позволяет

существенно улучшить энергопоглощающие свойства при сохранении статических упруго-проч

ностных характеристик и удельного веса. Предложенная методика открывает перспективы для разработки лёгких, высокоэффективных противоударных защитных систем и энергопоглощающих материалов нового поколения.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации определяется привлечением строгих математических формулировок и апробированных аналитических и численных методов решения задач механики сплошной среды, сравнением полученных решений с известными экспериментальными данными, численной валидацией приближенных аналитических решений для сетчатых структур с привлечением программных комплексов **Ansys Workbench** и **Femap/Nastan (MSC)** для моделирования метаматериалов с учетом детализированной геометрии ячеек периодичности, а также проведением экспериментальных испытаний с использованием известного и отлично зарекомендовавшего себя оборудования с соблюдением отечественных и международных стандартов проведения механических испытаний.

Личный вклад соискателя состоит в разработке методики идентификации материальных констант микро-дилатационной теории упругости и градиентной теории упругости за счет рассмотрения задач однородной и неоднородной деформации. Формулировании и разработке методики создания смещенных связей в структуре плоских и трехмерных сетчатых метаматериалов, обеспечивающая повышение их ударной прочности. Участие соавторов в указанных работах определялось их вкладом в формулировки рассматриваемых задач, формулировку применяемых аналитических моделей и выбор численных методов, помощь в проведении экспериментальных исследований и обработке экспериментальных данных. Подготовке статей по теме диссертации, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Приведённые в работе

результаты получены автором в ходе его прямого участия в проведении экспериментов, моделирования и анализа.

Приведенные положения позволяют заключить, что представленная диссертация является законченным научно-квалификационным исследованием, содержащем элементы научной новизны, имеющем важное прикладное и фундаментальное значение для развития теоретических и экспериментальной методов анализа механического поведения сетчатых метаматериалов. В ней представлены новые, обоснованные результаты, что соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 29 декабря 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Устенко Анастасии Дмитриевне учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 13, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета 24.1.508.01,
д.т.н.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.508.01,
К.Т.Н.

Подписи Власова А.Н. и Корнева Ю.В.
заверяю, учёный секретарь ИПРИМ РАН, к.т.н.

P. Bauer

Власов А.Н.

ВК/01/14

Корнев Ю.В.

Карнет Ю.Н.