

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.097.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 27.12.2022 г., протокол № 36

О присуждении **Чернакову Антону Павловичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Круговые призматические дислокационные петли и релаксация напряжений несоответствия в квазиодномерных наногетероструктурах» по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите 13 октября 2022 года (протокол заседания № 34) диссертационным советом 24.1.097.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 199178, Санкт-Петербург, Большой проспект В. О., д. 61, в соответствии с приказом о создании диссертационного совета № 930/нк от 14 июля 2016 года Министерства образования и науки Российской Федерации.

Соискатель Чернаков Антон Павлович, 1994 года рождения. Окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по специальности «Прикладная механика» в 2018 году. С 2011 по настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук в лаборатории Физики высокотемпературной плазмы (2011-2018, на должности «Лаборант») и в

лаборатории Лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью (2018-н.в., на должности «Младший научный сотрудник»).

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией механики наноматериалов и теории дефектов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Гуткин Михаил Юрьевич.

Официальные оппоненты:

– Груздков Алексей Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

1. Автор подтверждает достоверность полученных результатов ссылками на экспериментальные и теоретические результаты, полученные другими исследователями. В работе, однако, не всегда приводится иллюстративный материал, который позволил бы судить о степени соответствия или расхождения результатов.

2. В работе не рассматриваются прямолинейные дислокации несоответствия, поскольку они были рассмотрены в ряде предшествующих работ. Однако при определении критических условий зарождения призматических петель было бы интересно сравнить их с условиями зарождения других дефектов, в частности прямолинейных дислокаций. Утверждение, что образование призматических петель энергетически предпочтительней, не находит должного обоснования в работе.

3. Как следует из иллюстрации, приведённой в автореферате, сегментированная нанопроволока представляет собой последовательность фаз, границы раздела которых перпендикулярны оси цилиндра. В четвёртой главе, однако, критические условия формулируются только для радиуса проволоки. Влияние размера фаз в работе не обсуждается.

– Пронина Юлия Григорьевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов механики деформируемого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», дала положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

1. Насколько допустимо пренебрегать поверхностной энергией межфазных границ при исследовании дефектов кристаллической решётки в нанообъектах, особенно когда они расположены на расстояниях менее 15 нм от границы? Насколько может меняться характер поведения кривых для дислокационных петель вблизи межфазных границ на рис. 2.5-2.8, 3.3, 3.5 с учётом поверхностного натяжения?

2. Насколько допустимо пренебрегать изменением энергии ядра при определении условий формирования ПДП в нанопроволоке типа «ядро-оболочка»?

3. К каким материалам могут быть применены построенные в работе модели, если составляющие рассматриваемого композита имеют различные параметры решётки при одинаковых упругих характеристиках?

4. Допускает ли построенное решение для ПДП вокруг цилиндрического канала в бесконечном упругом пространстве предельный переход при стремлении радиуса канала к бесконечности? Если допускает, то проверялось ли согласование полученного решения с решением задачи о краевых дислокациях у границы упругого полупространства?

5. Поясните, пожалуйста, как вычислялись бесконечные суммы в выражениях для периодических дислокационных петель?

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук», г. Уфа, в своем положительном отзыве, подготовленном Назаровым Айратом Ахметовичем, доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником, заместителем директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, подписанном Имаевым Ренатом Мазитовичем, доктором технических наук, директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, указали, что

в диссертации представлены модели, построенные в рамках линейной теории упругости и континуальной теории дефектов, описывающие образование круговых призматических дислокационных петель в процессе релаксации напряжений несоответствия в нанопроволоках типа «ядро-оболочка», внедренных нанотрубках и сегментированных нанопроволоках. С помощью этих моделей выявлены критические условия формирования одиночной призматической дислокационной петли на границах раздела материалов в нанопроволоках типа «ядро-оболочка» и внедренных нанотрубках, а для сегментированных нанопроволок – на некотором удалении от межфазной границы. Также с их помощью исследовано равновесное распределение в бесконечном ряде круговых призматических дислокационных петель в нанопроволоках типа «ядро-оболочка». Созданные модели и полученные с их использованием диаграммы позволяют заранее определять параметры наночастиц, при которых в выращенных наноструктурах не образуются дефекты.

Отмечается, что диссертация Чернакова А.П. «Круговые призматические дислокационные петли и релаксация напряжений несоответствия в квазиодномерных наногетероструктурах» вносит существенный вклад в развитие механики деформируемого твердого тела и континуальных моделей наногетероструктур с дефектами. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела». Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 824 от 24.09.2013 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Чернаков Антон Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Доклад Чернакова А.П. по диссертации был заслушан и обсужден на заседании научного семинара Института проблем сверхпластичности металлов РАН и получил одобрение участников семинара (протокол № 9 от 21.11.2022 г.), в процессе обсуждения были высказаны следующие замечания:

1. В оглавлении отсутствует ссылка на первую главу.

2. Не понятен смысл использования различных обозначений для величины собственной дисторсии включения ε^* и численно равного ему параметра несоответствия f (формула 2.2).

3. В правой части формулы (2.28) в знаменателе скобки не имеют смысла.

4. На рис.3.3(в) приведены кривые, которые подписаны $a=0$ слева и $a/b=100$ справа, значения 20 и 50 это значения величины a или отношения a/b ?

5. Диаграммы изменения полной энергии, связанной с формированием круговой призматической дислокационной петли (Рис. 2.7, 3.5) полезно было бы выполнить и для других радиусов нанопроволоки. Также на рис. 2.7, 3.5 и 4.3 приведены значения красных и синих линий (-5000, -4000 и т.д.) это значения ΔE ? И в каких они единицах, не совсем понятно из рисунков и подрисуночных подписей.

6. В главе 4 L и z_0 дублируют друг друга, обозначая одно и то же расстояние от межфазной границы до плоскости залегания петли.

7. В качестве рекомендательного характера, разделы «Заключение» и «Список литературы», следовало бы вынести на новые страницы. А также список литературы выравнивать по ширине страницы.

8. При решении краевых задач теории упругости для композита предполагается, что модули сдвига и коэффициент Пуассона составляющих имеют одинаковые значения. Хотелось бы, чтобы были обсуждены возможности решения задач и возможные отличия эффектов при различии этих параметров.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 3 работы в научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также 9 статей и тезисов конференций, входящих в РИНЦ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью выбора методов моделирования физических явлений (линейная теория упругости, континуальная теория дефектов), корректностью постановок задач, строгостью использованного математического аппарата, выполнением граничных условий и условий равновесия, а также хорошим соответствием полученных расчетных данных экспериментальным.

Основные результаты автором апробированы в полной мере и соответствуют содержанию диссертации. В диссертации отсутствуют

недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах, вида, авторского вклада и объема научных изданий.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации:

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и WoS:

1. Chernakov, A.P., Kolesnikova, A.L., Gutkin, M.Yu., Romanov, A.E. Periodic array of misfit dislocation loops and stress relaxation in core-shell nanowires // International Journal of Engineering Science. 2020. Vol. 156. Art. No. 103367 (22 pages).
2. Kolesnikova, A.L., Chernakov, A.P., Gutkin, M.Yu., Romanov, A.E. Prismatic dislocation loops in crystalline materials with empty and coated channels // European Journal of Mechanics – A/Solids. 2022. Vol. 94. Art. No. 104612 (11 pages).
3. Kolesnikova, A.L., Chernakov, A.P., Gutkin, M.Yu., Romanov, A.E. Misfit strain induced out-of-interface prismatic dislocation loops in axially inhomogeneous hybrid nanowires // Extreme Mechanics Letters. 2022. Vol. 56. Art. No. 101861 (5 pages).

Статьи и тезисы в материалах научных конференций (РИНЦ):

1. А.П. Чернаков, М.Ю. Гуткин. Исследование равновесной системы петель дислокаций несоответствия в композитных нанопроволоках // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт прикладной математики и механики. – СПб., ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018, с. 230-232.
2. A.L. Kolesnikova, A.P. Chernakov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov. Misfit stress relaxation by dislocation loops in core-shell nanowires // “Saint Petersburg OPEN 2019” – 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, April 22-25, 2019. Book of Abstracts, Academic University Publishing, St. Petersburg, 2019, p. 38-41.
3. A.L. Kolesnikova, A.P. Chernakov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov. Misfit stress relaxation by dislocation loops in core-shell nanowires // XLVII International Conference "Advanced Problems in Mechanics", June 24-29, 2019, St. Petersburg. APM-2019, Book of Abstracts, 2019, p. 41-42.
4. A.L. Kolesnikova, A.P. Chernakov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov. Nucleation and equilibrium density of misfit dislocation loops in core-shell nanowires // International Conference “Mechanisms and Non-Linear

Problems of Nucleation and Growth of Crystals and Thin Films”, July 1-5, 2019, St. Petersburg, Russia; Book of Abstracts, p. 152.

5. A.L. Kolesnikova, A.P. Chernakov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov. Accommodation of misfit strain in core-shell nanowires by equilibrium distribution of prismatic dislocation loops // International Conference “Advanced Materials Week” (AMW-2019), September 17–21, 2019, St. Petersburg, Russia; Abstracts Book, Saint Petersburg, p. 24.
6. A.L. Kolesnikova, A.P. Chernakov, M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov. Misfit stress relaxation by dislocation loops in two-layer nanotubes // International Conference “Advanced Materials Week” (AMW-2019), September 17–21, 2019, St. Petersburg, Russia; Abstracts Book, Saint Petersburg, p. 49.
7. Ан.П. Чернаков, А.Е. Колесникова, М.Ю. Гуткин, А.Е. Романов. Исследование равновесного распределения петель дислокаций несоответствия в композитных нанопроволоках // Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов Всерос. науч. молодежн. конф., 23-27 ноября 2020 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020, с. 65.
8. Колесникова А.Л., Гуткин М.Ю., Чернаков А.П., Романов А.Е. Призматическая дислокационная петля в гибридной нанопроволоке с поперечной гетерограницей // LXIV Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 4–8 апреля 2022, Екатеринбург, Россия; доклад О1-23 6.04.22; В кн.: Сборник тезисов LXIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 4–8 апреля 2022, Екатеринбург, Россия; с. 74-76.
9. Kolesnikova A.L., Gutkin M.Yu., Chernakov A.P., Romanov A.E. Strain induced prismatic dislocation loop close to the heterointerface in the hybrid axial nanowire // L International Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM-2022), June 20-24, 2022; Book of Abstracts, p. 10.

На автореферат поступило 7 отзывов (все положительные):

1. Отзыв профессора, заведующего лабораторией физики полупроводниковых наноструктур физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» доктора физико-математических наук Владимира Германовича Дубровского без замечаний.

2. Отзыв профессора высшей школы механики и процессов управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктора физико-математических наук Николая Юльевича Золоторевского с замечанием:
- В автореферате отмечено, что, хотя в диссертации исследуется только релаксация напряжений за счёт образования круговых дислокационных петель, возможны и другие механизмы релаксации, в частности, за счёт прямолинейных дислокаций и дисклинаций. К сожалению, не представлено данных об эффективности формирования ПДП по сравнению с этими механизмами.
3. Отзыв профессора, главного научного сотрудника федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, доктора физико-математических наук Анны Георгиевны Князевой с замечаниями:
- Не ясен термин «квазиодномерные» применительно к изучаемым объектам. Это относится лишь к возможности сведения задач к одномерным? Но, например, на рис.4. представлены двумерные карты напряжений.
 - Как автор формулировал граничные условия на межфазных границах во всех рассмотренных задачах при нахождении полей напряжений и деформаций?
4. Отзыв главного научного сотрудника лаборатории неклассических моделей механики композитных материалов и конструкций федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт прикладной механики РАН, доктора технических наук, профессора Сергея Альбертовича Лурье с замечаниями:
- Некоторые трудности при знакомстве с текстом автореферата вызывает не вполне полная и своевременная расшифровка обозначений. Так например в формулах (1), не расшифровывается величина b . Определение этой величины как вектора Бюргерса даётся позже.
 - Из графиков рис. 6 действительно видно, что энергия взаимодействия двух соосных петель максимальная для ПДП одного типа, но не очевидно, что она минимальна для разных типов ПДП. Кстати не даётся определения типов ПДП.
 - На стр. 17 утверждается по поводу сегментированной нанопроволоки, что «формирование ПДП может служить эффективным каналом

релаксации напряжений несоответствия». Следует ли из этого, что могут быть и другие, альтернативные каналы релаксации.

- Не возникает ли проблем выбора критических параметров при малых значениях параметра c/a (см. Рис. 5).
5. Отзыв профессора, заведующего лабораторией физических основ прочности «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, доктора физико-математических наук Олега Борисовича Наймарка с замечаниями:
- Описание карты изменения энергии системы при формировании в ней одиночной ПДП и возможностей её применения для определения критических параметров (стр. 14 автореферата) и сама иллюстрация (Рис 10, стр. 16 автореферата) достаточно далеко разнесены друг от друга, что затрудняет восприятие материала.
 - Зависимости, приведённые на рис.7 автореферата, подписаны в разном формате: « $f=0,0717$ » и « $0,0667$ ». Рекомендуется использовать единый формат подписи данных: « $f=0,0717$ » и « $f=0,0667$ ».
6. Отзыв старшего научного сотрудника, профессора кафедры Физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Института естественных наук и математики Уральского федерального университета, доктора физико-математических наук Петра Евгеньевича Панфилова с замечанием:
- В качестве замечания, в случае, если бы работа подавалась по «физике конденсированного состояния», можно задать обычный для дислокационной модели вопрос об экспериментальных доказательствах её справедливости. Однако правильный выбор специальности позволяет «обойти» этот риторический вопрос.
7. Отзыв главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Российской академии наук Физико-технический институт имени Абрама Федоровича Иоффе, доктора физико-математических наук Владимира Викторовича Чалдышева, без замечаний.

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

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются компетентными и авторитетными учеными в области механики деформируемого твердого тела и механики сплошных сред, ведущими научную деятельность и имеющими научные публикации в областях науки, затрагиваемых диссертацией, а ведущая организация является одним из крупных научных центров в области материаловедения, физики конденсированного состояния и механики деформируемого твердого тела, в котором работают такие авторитетные ученые, как чл.-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н. Мулюков Радик Рафикович, д.ф.-м.н. Назаров Айрат Ахметович, д.т.н. Имаев Ренат Мазитович, и многие другие, способные оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- 1) **Получены** в удобной аналитической форме решения для полей напряжений, создаваемых призматической дислокационной петлей (ПДП) в бесконечном упругом цилиндре со свободной поверхностью, а также выражения для соответствующей энергии деформации.
- 2) С использованием этих решений **рассчитаны** критические параметры, при которых становится возможной релаксация напряжений несоответствия в нанопроволоке «ядро-оболочка» путем формирования ПДП.
- 3) **Найдены** энергия парного взаимодействия ПДП и равновесное расстояние между ПДП в бесконечном периодическом ряду в упругом цилиндре.
- 4) **Получены** решения для полей напряжений и энергии деформации, создаваемых ПДП, расположенной вокруг цилиндрического канала в бесконечном упругом пространстве.
- 5) С использованием этих решений **установлены** критические условия формирования ПДП на границе матрицы и внедренной в нее нанотрубки.
- 6) **Вычислена** энергия ПДП, расположенной вблизи межфазной границы в сегментированной нанопроволоке.
- 7) **Проанализированы** критические параметры, при которых формирование ПДП вблизи межфазной границы в сегментированной нанопроволоке становится энергетически выгодным.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанные теоретические модели

релаксации напряжений несоответствия в квазиодномерных наногетероструктурах и построенные диаграммы могут быть использованы на практике для выбора параметров выращиваемых наноструктур для улучшения их качества, вплоть до полного отсутствия дефектов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что

- эти результаты были получены с использованием хорошо апробированных методов пространственной линейной теории упругости и континуальных моделей теории дефектов.
- найденные аналитические решения граничных задач теории упругости о круговых призматических дислокационных петлях, расположенных в цилиндре и вокруг цилиндрической полости, удовлетворяют уравнениям равновесия и граничным условиям.
- расчетный период равновесного распределения петель дислокаций несоответствия в нанопроволоке типа «ядро-оболочка» InAs-GaAs, найденный при помощи разработанных моделей, хорошо соответствуют прямым экспериментальным наблюдениям.

Личный вклад соискателя состоит в

- Участии в постановке целей и задач диссертационного исследования.
- Построении моделей композитных наноструктур с несоответствием и решении задач о зарождении в них призматических дислокационных петель.
- Участии в подготовке публикаций по теме диссертации и апробации результатов исследований на конференциях и научных семинарах.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- При наличии в публикациях большого количества снимков нанопроволок «ядро-оболочка» и данных о распределении в них призматических дислокационных петель, желательно проверить созданные модели на соответствие эксперименту на большем количестве реальных наногетероструктур.
- В качестве сегментированных нанопроволок автор рассмотрел только наногетероструктуру, состоящую из двух полубесконечных фаз, в то время как сегментированные нанопроволоки могут представлять собой

комбинацию большого количества сегментов разной длины из разных материалов. Рекомендуется исследовать и более сложные варианты сегментированных нанопроволок.

Соискатель Чернаков А. П. согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему вопросы и сообщил, что исследование более сложных вариантов сегментированных нанопроволок им уже ведется.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Чернакова Антона Павловича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842.

На заседании 27 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение за разработку новых континуальных моделей композитных наногетероструктур с призматическими дислокационными петлями присудить Чернакову Антону Павловичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 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 – 14, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя

диссертационного совета 24.1.097.01

д.т.н., профессор



Полянский

Владимир Анатольевич

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.097.01

д.т.н.

Седакова

Елена Борисовна

27 декабря 2022 г.