

Немов Александр Сергеевич

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КАБЕЛЕЙ
С МНОГОУРОВНЕВОЙ КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРОЙ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена на кафедре “Механика и процессы управления”
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Боровков Алексей Иванович

Официальные оппоненты

Петрениа Юрий Кириллович,
доктор физико-математических наук,
профессор, чл.-корр. РАН,
зам. генерального директора – технический
директор ОАО “Силовые машины”

Мельников Борис Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой “Сопротивление материалов”
инженерно-строительного института СПбГПУ

Ведущая организация:

Институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится «25» декабря 2013 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета
Д 212.229.05 ФГБОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет” по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II уч.
корпус, ауд. 265

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Воробьева Татьяна Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Осуществление на Земле управляемого термоядерного синтеза – проблема, над которой ученые всего мира работают уже более полувека. Интерес человечества к этой проблеме обусловлен, прежде всего, надеждами на создание в будущем термоядерной энергетики, способной удовлетворить постоянно растущие энергетические потребности человечества на фоне истощения природных запасов органических видов топлива. Сегодня одним из наиболее перспективных направлений считается создание систем с магнитным удержанием плазмы типа “токамак”. Однако, несмотря на то, что к сегодняшнему дню в мире было построено около 300 токамаков, достигнуть условий существования стационарной самоподдерживающейся реакции термоядерного горения пока не удалось ни на одном из них. Большие надежды ученые всего мира в настоящий момент возлагают на строящийся токамак с беспрецедентными параметрами ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). В случае успеха проекта ITER должен впервые обеспечить условия для самоподдерживающейся реакции управляемого термоядерного синтеза.

Ключевое свойство систем типа «токамак» – наличие сильного магнитного поля, удерживающего высокотемпературную плазму. Для создания таких магнитных полей при наличии ограничений на энергетические затраты в современных токамаках применяют магнитные катушки со сверхпроводящими обмотками. Так как по данным экспериментов последних десятилетий, механические деформации и напряжения в сверхпроводниковых нитях могут приводить к деградации их свойств, напряженно-деформированное состояние кабеля и его элементов под действием различных возможных нагрузок представляет несомненный интерес. Несмотря на то, что при проектировании ITER широко используется математическое моделирование, в настоящее время явно ощущается нехватка законченной методики расчета напряженно-деформированного состояния жил кабеля и содержащихся в них нитей сверхпроводника на основе известных нагрузок на кабель. Отсутствие таких результатов можно объяснить сложностью многоуровневой структуры кабеля: кабель состоит из более чем 1 400 жил, каждая из которых включает в себя более 4 600 нитей сверхпроводника. С точки зрения проведения расчетов ситуация осложняется неизвестностью точного расположения жил внутри кабеля (в процессе изготовления кабель обжимается) и необходимостью учитывать множественное пространственное контактное взаимодействие между жилами. Тема диссертационной работы является актуальной, так как посвящена разработке методов расчета локального напряженно-деформированного состояния сложной микронеоднородной композитной структуры – кабеля и его элементов под действием внешних нагрузок. Важно отметить, что разработанные методы учитывают множественное пространственное контактное взаимодействие и позволяют вычислять локальные напряжения и деформации в отдельных волокнах сверхпроводника, что необходимо для оценки эксплуатационных характеристик кабеля.

Цели работы.

1. Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния сложных кабелей с многоуровневой композитной структурой, позволяющей определять напряжения и деформации как на макроуровне (макронапряжения, макродеформации), так и на уровне микроструктуры (локальные напряжения или микронапряжения, то есть напряжения в отдельных нитях сверхпроводника или между нитями), включая краевые эффекты
2. Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния элементов кабелей многоуровневой свивки под действием различных нагрузок.

Задачи исследования.

1. Анализ существующих методов гомогенизации композитных структур – вычисления эффективных термоупругих характеристик. Конечно-элементная реализация и применение к композитной структуре жилы кабеля ITER различных методов гомогенизации; сравнительный анализ результатов, полученных различными методами.
2. Анализ существующих методов восстановления микрополей напряжений и деформаций (методов гетерогенизации) композитных структур. Конечно-элементная реализация и применение к анализу локального напряженного состояния композитной структуры жилы кабеля методов гетерогенизации; оценка точности методов определения микронапряжений путем сравнения с эталонным решением.
3. Разработка методики многоуровневой гомогенизации и гетерогенизации (восстановления микрополей) в задачах термоупругости на основе метода базовых решений; ее конечно-элементная реализация и применение к композитной структуре жилы кабеля ITER.
4. Определение эффективных анизотропных упругих характеристик жилы кабеля катушки тороидального магнитного поля токамака ITER при различных температурах.
5. Разработка геометрических и конечно-элементных моделей элементов сверхпроводящего кабеля. Разработка алгоритма построения начальной конфигурации кабеля сложной структуры.
6. Верификация и валидация предложенных методик и разработанных моделей путем сравнения результатов конечно-элементных расчетов с результатами, полученными другими авторами а другими методами.
7. Конечно-элементное решение задач о растяжении, кручении и поперечном деформировании элементов кабеля. Выявление основных особенностей напряженно-деформированного состояния кабелей под действием различных нагрузок.

Методы исследования.

В работе использованы методы теории упругости и пластичности, механики композиционных материалов и механики контактного взаимодействия, вычислительной

механики. Для численного решения задач использован современный теоретически обоснованный метод конечных элементов (МКЭ).

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

- разработаны и применены к двухуровневой композитной структуре жилы кабеля ITER конечно-элементные реализации различных методов гомогенизации и гетерогенизации;

- предложены и реализованы методы и алгоритмы многоуровневой гомогенизации и гетерогенизации на основе метода базовых решений, применимые для анализа термонапряженного состояния сверхпроводящих нитей в кабеле ITER;

- впервые в инженерной практике проектирования и создания сверхпроводящих магнитных систем термоядерных реакторов получены и исследованы детальные напряженно-деформированные состояния сложных кабелей (вплоть до структуры $3 \times 3 \times 5 \times 5 + 3 \times 4$) под действием различных внешних нагрузок и с учетом множественных пространственных контактных взаимодействий между всеми волокнами кабеля.

Достоверность полученных результатов и сделанных выводов определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, обоснованным применением современного численного метода (МКЭ), а также сравнительным анализом решений, полученных с помощью различных детально верифицированных коммерческих программных систем конечно-элементного анализа (ANSYS, LS-DYNA, Abaqus, MSC.Marc) и с помощью различных математических моделей, как автором диссертации, так и зарубежными коллегами (Prof. B. Schrefler, University of Padue, Италия), принимавшими участие в комплексных исследованиях этой сложной проблемы механики.

Практическая ценность. Работы по исследованию механического поведения кабелей магнитной системы токамака ITER выполнены в рамках совместных проектов с международным центром CISM (International Centre For Mechanical Sciences) и University of Padue (Италия). Поскольку поставка сверхпроводящих материалов в рамках проекта ITER – один из вкладов Российской Федерации в международный проект, то результаты работы несомненно полезны и для отечественной промышленности. Разработанные в диссертации общие методы и алгоритмы расчета сложных многоуровневых композитных структур применимы не только для кабелей магнитной системы ITER, но и для других объектов с многоуровневой структурой.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Математические и конечно-элементные модели элементов многоуровневых сверхпроводящих кабелей;

- Результаты конечно-элементной реализации и применения к двухуровневой композитной структуре жилы кабеля ITER различных методов гомогенизации (вычисления эффективных термоупругих характеристик) и восстановления микрополей (микронапряжений, микродеформаций, микроперемещений);

- Методики выполнения многоуровневой гомогенизации и гетерогенизации в задачах термомеханики композитных структур на основе метода базовых решений и их реализация в виде специализированного кода к программной системе конечно-элементного анализа ANSYS;

- Результаты расчета напряженно-деформированного состояния кабелей сложной структуры под действием различных нагрузок.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены автором на:

- международной конференции пользователей LS-DYNA в г. Зальцбург (Австрия) в 2009 году;

- международной конференции по вычислительной механике «IV European Conference on Computational Mechanics» в г. Париж (Франция) в 2010 году;

- научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность» в СПбГПУ в 2010 году;

- XXXVIII-XXXIX международных научно-практических конференциях «Неделя науки СПбГПУ» (С.-Петербург, 2009 - 2010 гг.);

- научных семинарах на кафедре «Механика и процессы управления» физико-механического факультета СПбГПУ (2006-2013 гг.);

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ», входящем в перечень изданий, публикации которых признаются Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России и одна в реферируемом зарубежном журнале "Cryogenics", который индексируют базы данных Scopus и Web of Science и который имеет импакт-фактор 1.17.

Структура и объем. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 199 стр., включая 123 рис. и 3 табл. Список литературы содержит 105 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность решаемых в работе задач, сформулированы цели и задачи исследования, а также изложено краткое содержание работы.

В первой главе диссертации приведены необходимые для понимания тематики работы общие сведения об управляемом термоядерном синтезе и устройствах типа «токамак», описан объект исследования – кабель магнитной системы токамака ITER, а также представлен обзор экспериментальных исследований деградации параметров сверхпроводимости используемого в кабелях сверхпроводящего материала под действием механического нагружения, поясняющих актуальность проводимых в работе исследований.

В работе рассматриваются вопросы механики сверхпроводящих кабелей магнитных катушек тороидального магнитного поля токамака ITER. Каждый такой кабель имеет достаточно сложную многомасштабную иерархическую структуру и состоит из более чем

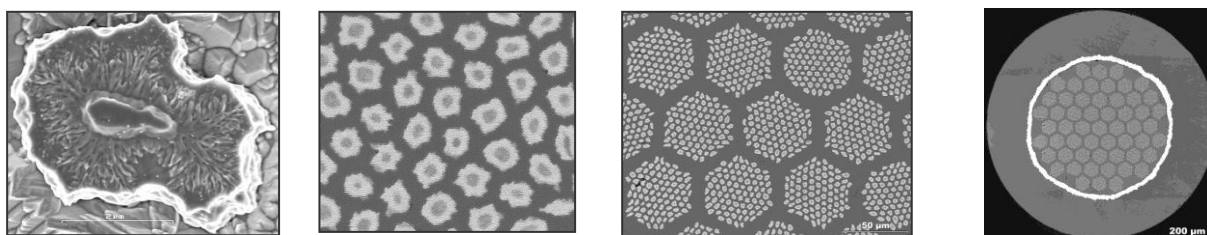
1 400 жил, сплетенных многоуровневой свивкой. Процесс сборки кабеля начинается со свивки прядей, состоящих из трех нитей (триплетов). Затем каждые 3 триплета сплетаются в кабель двойной свивки 3×3 . Кабели 3×3 , в свою очередь, свиваются в кабели $3 \times 3 \times 5$, и далее – в $3 \times 3 \times 5 \times 5$ с добавлением сердечника 3×4 . В конечном итоге шесть сплеток $3 \times 3 \times 5 \times 5 + 3 \times 4$ навиваются вокруг канала охлаждения и размещаются внутри стальной трубки. При этом каждая жила рассматриваемого кабеля сама по себе также имеет сложную многоуровневую структуру и содержит в себе 4 675 нитей сверхпроводника Nb_3Sn , которые собраны в 55 групп по 85 в каждой и окружены бронзовой матрицей. Снаружи бронзовая матрица с нитями сверхпроводника окружена танталовым барьером, а далее – бескислородной медью.

Таким образом, если не рассматривать микроструктуру жил, кабели магнитной системы токамака ITER по своей структуре напоминают широко применяемые в технике и строительстве тросы и канаты. Для расчета последних разработано и опубликовано большое количество методов, как отечественными (М.Ф. Глушко, В.А. Малиновский, М.П. Калиничееко, Ю.И. Назаров, С.Т. Сергеев, В.М. Мусалимов и др.) так и зарубежными (F. Berg, G. Heinrich, G.A. Costello, F. Dreher, K. Feurer и др.) авторами. Среди наиболее проработанных методик следует отметить методики, основанные на работах М.Ф. Глушко и его учеников. Они основаны на методах строительной механики стержней и заключаются в том, что трос рассматривают как систему криволинейных стержневых элементов, подверженных растяжению, кручению, изгибу и контактному давлению. Принципиально другим направлением является рассмотрение кабеля сплошным цилиндрическим телом со спиральной анизотропией, отражающей конструкцию троса. Этот подход подробно описан в работах В.М. Мусалимова. Однако, используемые в технике и строительстве тросы, хотя и содержат в себе зачастую большое количество жил, имеют, как правило, не более двух уровней свивки, и все описанные методики ориентированы именно на них. Рассматриваемый же кабель магнитной системы ITER имеет более сложную структуру, и перечисленные выше методики расчета тросов и канатов могут лишь весьма ограниченно быть применены к нему. Поэтому в качестве основного метода исследования в работе применяется прямое конечно-элементное решение задач термомеханики композитных структур с множественным контактными взаимодействием. Изложение основных положений используемого в работе математического аппарата, а также краткий обзор основных методов решения задач механики кабелей и механики композиционных материалов представлены **во второй главе**.

Очевидно, что прямой учет композитной структуры жил при исследовании поведения всего кабеля и даже его элементов не представляется возможным. В то же время, именно напряженно-деформированное состояние на микроуровне в конечном итоге представляет интерес для прогнозирования сверхпроводящих параметров кабеля. Поэтому **третья глава** диссертации посвящена вопросам многоуровневой гомогенизации

композитной структуры жилы кабеля ITER и вопросам восстановления микрополей в данной структуре.

При решении задач механики композиционных материалов, как правило, вводят рассмотрение микро- (μ), мезо- (m) и макро- (M) уровни. В представленной структуре логично выделить μ -уровень – уровень отдельного включения Nb_3Sn (рис. 1а), m_1 -уровень – уровень включений Nb_3Sn внутри группы (рис. 1б), m_2 -уровень шестиугольных групп включений Nb_3Sn (рис. 1в) и M -уровни жил сверхпроводящего кабеля (рис. 1г) и их свивок, вплоть до всего кабеля.



а) микроуровень μ б) мезоуровень m_1 в) мезоуровень m_2 г) макроуровень M

Рис. 1. Многоуровневая композитная структура жилы сверхпроводящего кабеля [2]

На основе введенного разделения масштабов могут быть сформулированы процедуры многоуровневой (в рассматриваемом случае, двухуровневой) гомогенизации и гетерогенизации. Целью выполнения процедуры двухуровневой гомогенизации является получение модели среды с гомогенной, но анизотропной средой внутри танталового барьера, эквивалентной по своим физико-механическим свойствам исходной гетерогенной жиле с включениями сверхпроводника (рис. 1).

1. Гомогенизация на мезоуровне m_1 .

Если ввести символический оператор гомогенизации H^* , то эта процедура может быть записана в виде формулы (1), показывающей, что тензор эффективных упругих модулей зависят от тензора упругих свойств компонентов $C^{(i)}$, микроструктуры ячейки периодичности (ЯП) (объем компонентов $V^{(i)}$, их форма $\Phi^{(i)}$, особенностей сопряжения) и от других специфических особенностей композита:

$$C^{*(m_1)} = H_{m_1}^* \left\{ C_{\mu}^{(i)}, V_{\mu}^{(i)}, \Phi_{\mu}^{(i)}, \dots \right\} \quad (1)$$

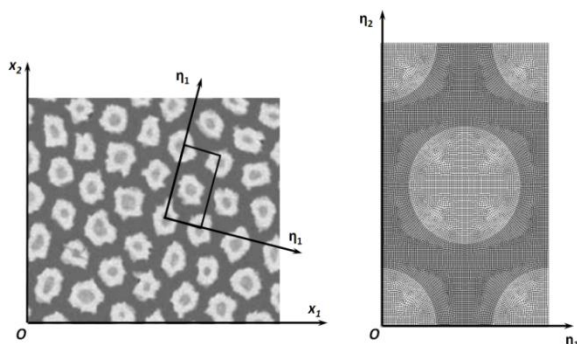


Рис. 2. Уровень отдельных включений - масштаб m_1

Для вычисления компонентов эффективного тензора упругости $C^{*(m1)}$ были реализованы на основе КЭ решения задач теории упругости

микронеоднородной среды и применены три наиболее распространенных метода гомогенизации: метод асимптотического осреднения, численный метод гомогенизации на основе квазипериодических граничных условий и метод прямой гомогенизации. Показано, что различие в полученных различными методами значениях эффективных упругих модулей не превышает 0.5%.

2. Преобразование тензора упругих модулей при повороте системы координат.

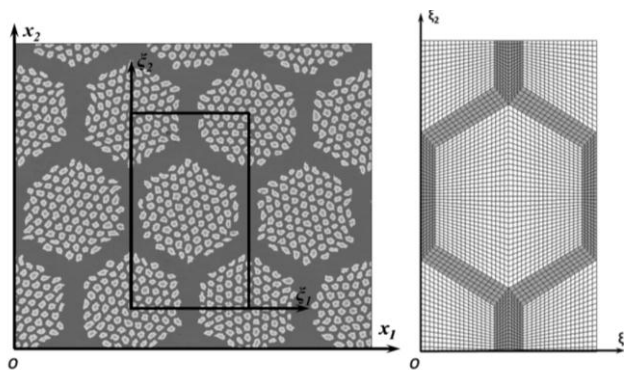
Решение локальных задач на рассмотренной на предыдущем шаге ячейке периодичности в локальных координатах $(O\eta_1\eta_2)$ привело к макроскопически ортотропному в этих координатах эквивалентному эффективному материалу. Поскольку оси системы координат, в которых рассматривается ячейка последующего уровня в общем случае не совпадают с осями, в которых решались задачи на ЯП уровня m_1 , (см., например, рис. 1) необходимо выполнить преобразование поворота на некий угол $\alpha^{(m_1)}$ для компонентов тензора $C^{*(m_1)}$:

$$C^{*(m_1)'} = P(C^{*(m_1)}, \alpha^{(m_1)}) \quad (2)$$

Следует отметить, что после преобразования поворота новый тензор эффективных упругих модулей в общем случае перестает соответствовать ортотропному материалу (в матрице эффективных модулей появляются ненулевые компоненты C_{14}^* , C_{24}^* , C_{34}^* , C_{56}^* и парные им).

3. Гомогенизация на мезоуровне m_2 .

Следующим шагом является гомогенизация на уровне m_2 . На этом шаге рассматриваются группы по 85 включений сверхпроводника. Используемая для получения эффективных упругих свойств на уровне m_2 конечно-элементная модель ячейки



периодичности представлена в правой части рис. 3. Данная модель содержит в себе как реальные материалы композита $C_{\mu}^{(i)}$, так и области с эффективными упругими свойствами, полученными на предыдущем шаге $C^{*(m_1)'}$. Процедура гомогенизации может быть представлена в виде

Рис. 3. Уровень групп включений - масштаб m_2

$$C^{*(m_2)} = H_{m_2}^* \{C^{*(m_1)'}, C_{\mu}^{(i)}, \dots\} = H_{m_2}^* \{P(H_{m_1}^* \{C_{\mu}^{(i)}, \dots\}, \alpha_1), C_{\mu}^{(i)}, \dots\} \quad (3)$$

С помощью предложенной и реализованной с применением программной системы КЭ анализа ANSYS процедуры многоуровневой гомогенизации были вычислены эффективные анизотропные термоупругие и теплофизические свойства композитной структуры (тензоры упругих модулей, коэффициентов теплопроводности и

коэффициентов линейного теплового расширения) сверхпроводящего кабеля при различных температурах в диапазоне от 4 до 1 000 К (диапазон температур, при которых может находиться кабель в соответствии с технологиями изготовления и эксплуатации).

Вычисленные эффективные физико-механические свойства далее используются при расчетах механического поведения кабеля, что позволяет воспроизвести в модели адекватное упругое поведение кабеля без детального моделирования его структуры. Результатом решения таких задач являются макрополя напряжений и деформаций в конструкции. Для того, чтобы определить реальные микронапряжения и микродеформации, необходима процедура восстановления микрополей (гетерогенизации), являющаяся в общем случае также многоуровневой. Рассмотрены три распространенных метода восстановления микрополей: 1) гетерогенизация на основе решения задачи с квазипериодическими кинематическими граничными условиями на ЯП или на области из нескольких ЯП; 2) гетерогенизация на основе метода субмоделирования; 3) решение "гибридной" задачи, содержащей как гомогенизованную зону, так и зоны с учтенной микроструктурой различных уровней вплоть до уровня m_1 ("прямая гетерогенизация").

Метод гетерогенизации на основе квазипериодических граничных условий основан на решении задачи теории упругости на ячейке периодичности с граничными условиями, реализующими в ячейке заданные наперед осредненные по объему ячейки значения компонентов тензора деформации. В качестве граничных условий используются те же условия квазипериодичности компонентов вектора перемещения на противоположных гранях ЯП, что и при численном методе гомогенизации на основе квазипериодических граничных условий. Второй рассмотренный метод гетерогенизации основан на широко применяемом в инженерной практике методе субмоделирования. Основной идеей метода субмоделирования является уточнение решения в отдельной области на основе подробной модели этого фрагмента (субмодели). В качестве граничных условий на границах субмодели используются полученные в решении макрозадачи перемещения или усилия на границах субмодели. Третий рассматриваемый метод представляет собой решение "homotet" задачи, то есть задачи, в которой основная часть композитной структуры заменена однородной средой с эффективными упругими свойствами, а в представляющей наибольший интерес области воссоздана вся микроструктура вплоть до уровня m_1 .

Все три метода применены к задаче о плоской деформации сечения одной жилы кабеля под действием приложенного по трем площадкам давления, моделирующего контактное взаимодействие с тремя другими жилами (рис. 4) и на примере данной задачи исследованы возможности трех перечисленных методов восстановления напряжений. При этом в случае первых двух из рассмотренных методов применена процедура двухуровневой гетерогенизации, аналогичная по своей структуре представленной ранее процедуре двухуровневой гомогенизации.

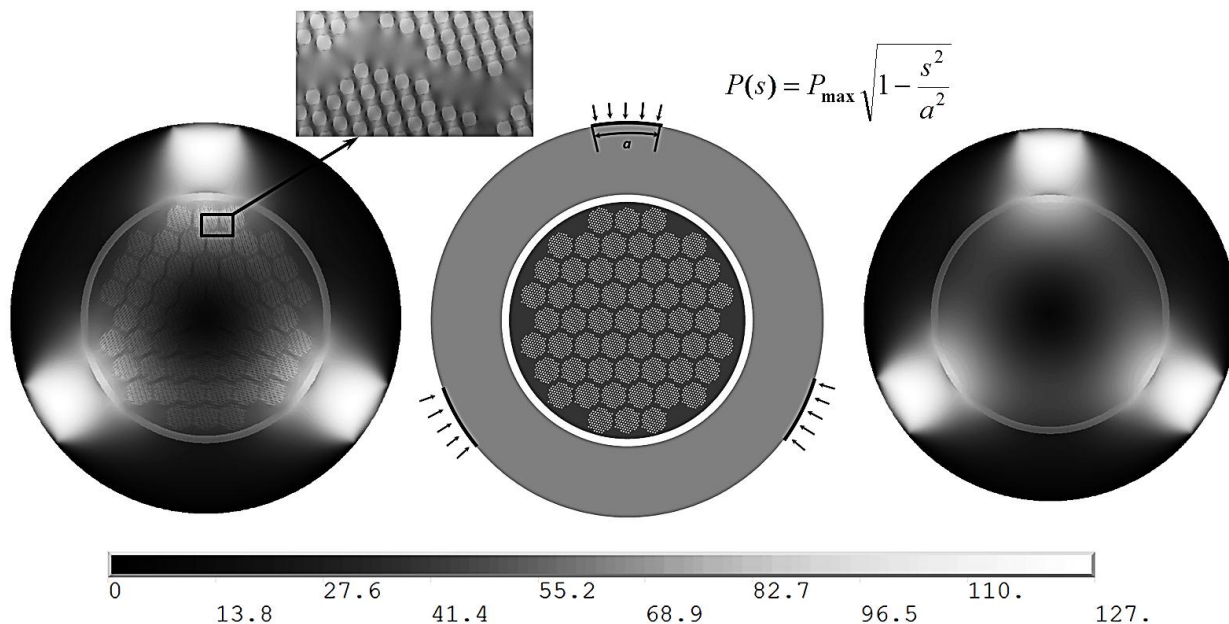


Рис. 4. Задача о плоском деформировании жилы кабеля (по центру); распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (кПа) в эталонном решении (слева) и в решении гомогенизированной задачи (справа)

В результате сравнения результатов, полученных всеми тремя методами для описанной задачи о плоском деформировании жилы кабеля с эталонным решением (рис. 4 слева) установлено, что для области с низким градиентом полей, расположенной вдали от границ композитной структуры (рис. 5а), все три метода позволяют получить микрополя, отличающиеся от эталонного менее чем на 5%. Однако для области вблизи границы периодической структуры (рис. 5б) установлено, что метод, основанный на квазипериодических кинематических граничных условиях, может приводить к ошибке более 10% в значениях микронапряжений. При этом показано, что решение "homo-het" задачи является наиболее точным (хотя в некоторых случаях и наиболее трудоемким) методом восстановления микрополей и позволяет получить микрополя с ошибкой менее 3%.

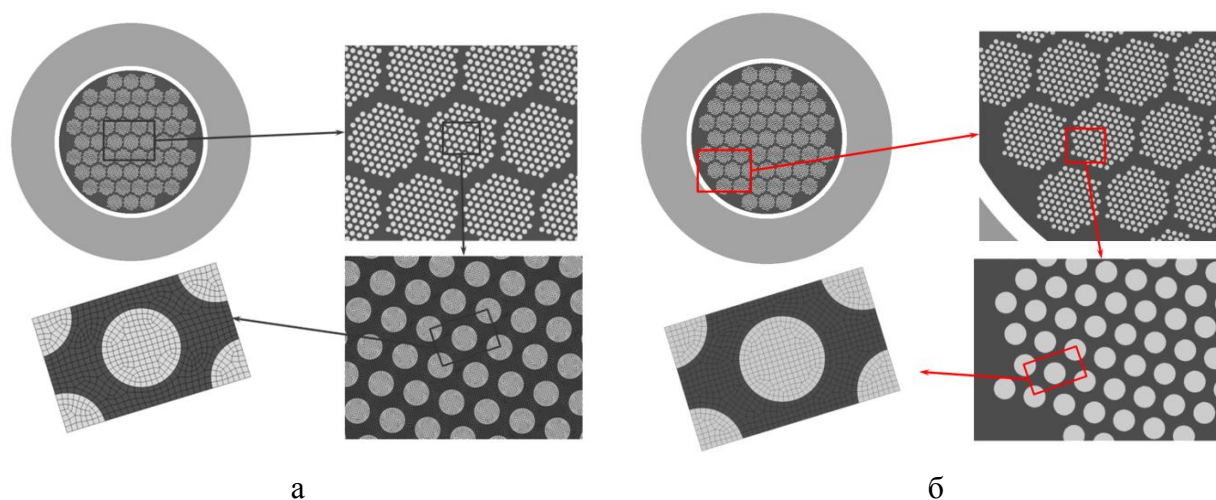


Рис. 5. Эталонная КЭ модель, области для сравнения с результатами гетерогенизации

Говоря о применении метода прямой гомогенизации, нельзя не упомянуть о том, что на границе раздела гомогенизированной области и области с микроструктурой многие компоненты тензоров микронапряжений и микродеформаций терпят разрыв, что влечет за собой увеличенную погрешность определения микрополей в этой области. Для уменьшения этой погрешности целесообразным является окружение ячейки периодичности, представляющей основной интерес, областью с микроструктурой (см., например, рис. 6). В работе исследован вопрос о влиянии размера такой зоны на результирующее локальное напряженно-деформированное состояние в представляющей интерес ячейке, что позволило высказать практические рекомендации по применению данного метода.

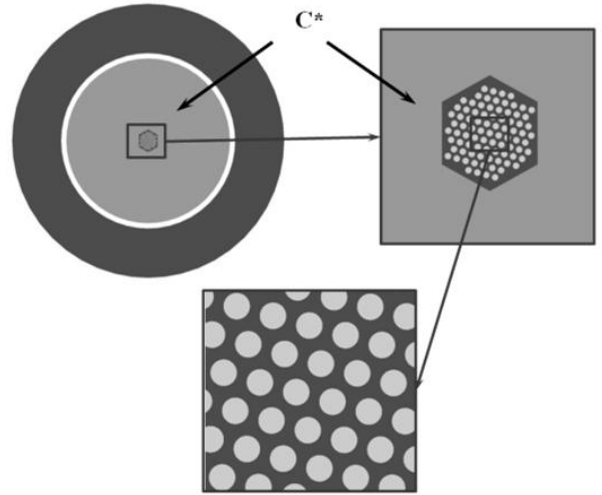


Рис. 6. Пример "homo-het" модели

Помимо широко распространенных методов гомогенизации и гетерогенизации, рассмотренных в первой части главы, в работе рассмотрено применение к двухуровневой композитной структуре метода “базовых решений” и “регулярных разложений”. В работе выполнено обобщение предложенного В.А. Пальмовым и А.И. Боровковым метода на задачи термоупругости (на случай наличия в теле температурных деформаций) и предложено доказательство периодичности полей напряжений в базовых задачах. Обобщение на случай наличия температурных деформаций требует введения в число базовых задач дополнительной седьмой задачи о равномерном нагреве ячейки периодичности. Регулярное разложение решений уравнений теории упругости для композита в этом случае имеет вид:

$$\boldsymbol{\sigma} = \sum_{k=1}^6 \alpha^{(k)} \boldsymbol{\sigma}^{(k)} + \alpha^{(7)} \boldsymbol{\sigma}^{(7)} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{k=1}^6 \alpha^{(k)} \boldsymbol{\varepsilon}^{(k)} + \alpha^{(7)} \boldsymbol{\varepsilon}^{(7)} \quad \mathbf{u} = \sum_{k=1}^6 \alpha^{(k)} \mathbf{u}^{(k)} + \alpha^{(7)} \mathbf{u}^{(7)}, \quad (4)$$

где верхними индексами обозначена принадлежность тензоров напряжений и деформаций, а также векторов перемещения к соответствующей базовой задаче; $\alpha^{(k)}$ – коэффициенты, определяющие вклад того или иного базового решения в регулярное разложение. Регулярные разложения могут быть использованы для нахождения эффективных упругих характеристик композиционного материала и для восстановления микронапряжений и микродеформаций в выбранной ячейке на основе решения макрозадачи, в которой композитная структура заменена однородным эффективным анизотропным материалом. В первом случае формулы для нахождения эффективных упругих характеристик, предложенные В.А. Пальмовым и А.И. Боровковым, должны быть

дополнены предложенным в работе соотношением для нахождения эффективных коэффициентов линейного расширения α_1^*, α_2^* и α_3^* , а во втором случае формулы для восстановленных напряжений и деформаций принимают вид:

$$\sigma_{\text{восст}} = \Sigma \cdot \langle \mathbf{E} \rangle^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{homog}} + \frac{\Delta T}{\delta} \begin{pmatrix} \sigma_{11}^{(7)} \\ \sigma_{22}^{(7)} \\ \sigma_{33}^{(7)} \\ \sigma_{12}^{(7)} \\ \sigma_{23}^{(7)} \\ \sigma_{13}^{(7)} \end{pmatrix}; \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{восст}} = \mathbf{E} \cdot \langle \mathbf{E} \rangle^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{homog}} + \frac{\Delta T}{\delta} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^{(7)} \\ \varepsilon_{22}^{(7)} \\ \varepsilon_{33}^{(7)} \\ \varepsilon_{12}^{(7)} \\ \varepsilon_{23}^{(7)} \\ \varepsilon_{13}^{(7)} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где Σ и \mathbf{E} – матрицы напряжений и деформаций первых шести базовых задач, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{homog}}$ – тензор деформаций из решения макрозадачи, δ – величина перепада температуры, используемая в седьмой базовой задаче, ΔT – разность температуры по отношению к отсчетной, а столбцы компонентов тензора напряжений и тензора деформаций с индексом “7” соответствуют решению седьмой базовой задачи.

Метод базовых решений был применен к определению эффективных характеристик и восстановлению микрополей в двухуровневой структуре жилы сверхпроводящего кабеля ITER. Рассмотрена возможность и целесообразность применения как одноуровневой, так и двухуровневой процедуры, когда в качестве решения макрозадачи используются восстановленные на первом шаге поля напряжений и деформаций. Пример результата восстановления одного из компонентов тензора напряжений в некоторой ячейке структуры жилы кабеля для случаев одноуровневого и двухуровневого восстановления напряжений и их сравнение с эталонным решением представлены на рис. 7, иллюстрирующем соответствие восстановленных с помощью двухуровневой процедуры локальных напряжений эталонным с ошибкой менее 1%.

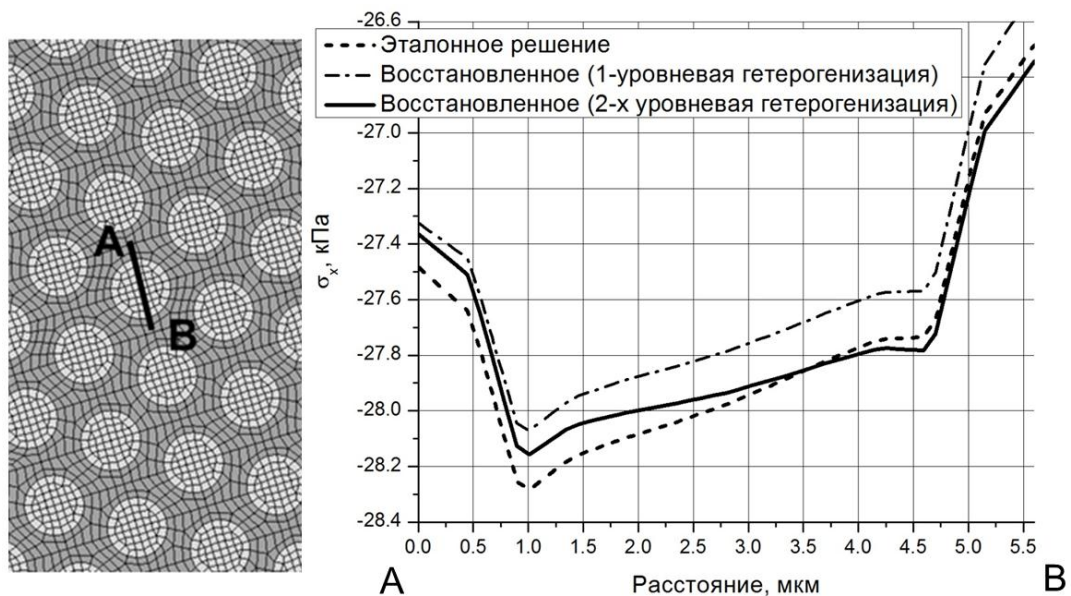


Рис. 7. Результаты восстановления микронапряжений в ячейке структуры жилы кабеля с помощью метода базовых решений

Четвертая глава посвящена вопросам решения задач механики кабеля ИТЭР с многоуровневой структурой с эффективными гомогенизированными свойствами отдельных жил. Рассмотрены задачи растяжения, кручения и поперечного обжатия для элементов кабеля магнитной системы ИТЕР, отражающих его иерархическую структуру: триплета (кабель 1x3), кабеля 3x3, кабеля 3x3x5 и кабеля 3x3x5x5+3x4. Фрагменты разработанных пространственных геометрических моделей указанных кабелей представлены на рис. 8.

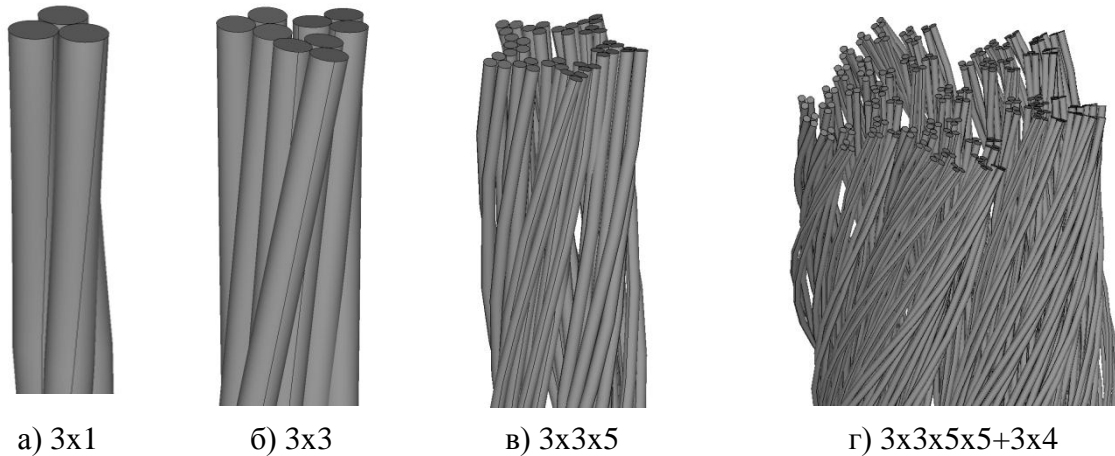


Рис. 8. Фрагменты геометрических моделей элементов сверхпроводящего кабеля

Сложность описания механического поведения канатов обусловлена, в первую очередь, необходимостью учета множественного пространственного контактного взаимодействия между нитями каната, что в большинстве практических случаев делает невозможным получение точного аналитического решения. В настоящей работе в качестве основного метода исследования применяется прямое пространственное КЭ моделирование, однако в случаях, когда это возможно, выполняется сравнение с аналитическими результатами, основанными на теории растяжения и кручения канатов (М.Ф. Глушко, В.А. Малиновский, С.Т. Сергеев и др.), оперирующей линейными уравнениями статического равновесия упругого каната:

$$\begin{cases} A \cdot \varepsilon + C \cdot \Theta = T \\ C \cdot \varepsilon + B \cdot \Theta = M \end{cases}, \quad (6)$$

где T и M – приложенные к канату сила и крутящий момент, соответственно, ε и Θ – продольные и угловые деформации каната, а A , B и C – обобщенные коэффициенты жесткости каната. Для не слишком сложных элементов кабеля жесткостные коэффициенты могут быть оценены аналитически. В работе последовательно выполнено моделирование элементов

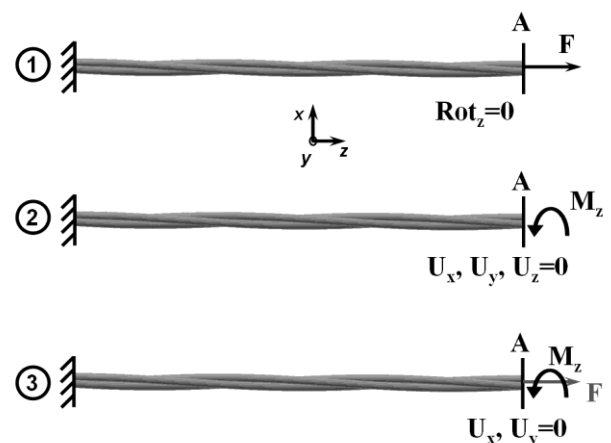


Рис. 9. Задачи для определения жесткостных коэффициентов элементов кабеля на основе прямого КЭ моделирования

кабеля магнитной системы ITER, начиная с простейшего элемента – свивки из трех жил, далее – свивки 3x3, и т.д. вплоть до структуры 3x3x5x5+3x4. Для каждого из элементов разработаны детальные пространственные конечно-элементные модели, и коэффициенты жесткости каната вычислены как на основе аналитических оценок, так и с помощью прямого КЭ моделирования путем решения трех задач о растяжении, кручении и смешанном деформировании кабеля (рис. 9). Установлено, что для триплета (элемента кабеля из трех свитых жил), являющегося спиральным канатом, жесткостные коэффициенты, вычисленные на основе аналитических оценок, отличаются от результатов прямого КЭ моделирования с учетом пространственного контактного взаимодействия не более чем на 4%. Для расчета жесткостных коэффициентов элемента кабеля более высокого уровня, имеющего структуру 3x3 и состоящего из трех скрученных триплетов (рис. 8б), могут быть применены подходы, разработанные для канатов двойной свивки. На рис. 10 представлено сравнение результатов моделирования растяжения кабеля 3x3 на

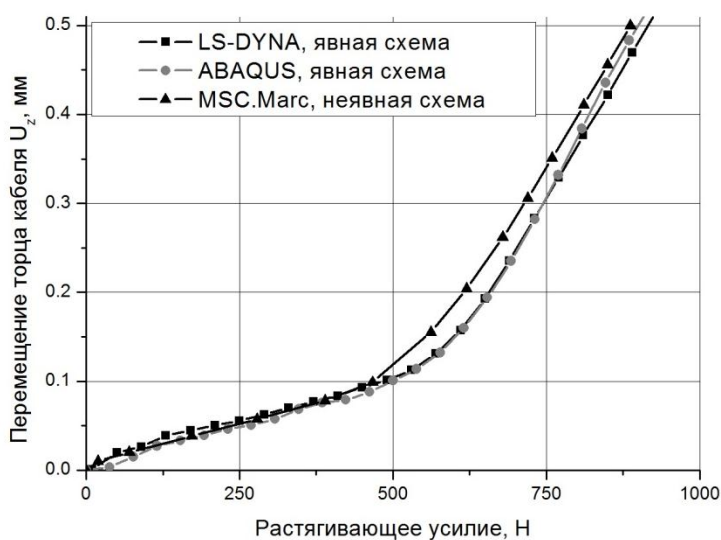


Рис. 10. Сравнение результатов растяжения кабеля 3x3, полученных с помощью различных систем КЭ анализа

основе прямого КЭ моделирования с учетом пространственного контактного взаимодействия между жилами и упруго-пластического поведения материала жил, выполненного с помощью различных программных систем КЭ анализа и различных схем интегрирования по времени. Ввиду большей сложности геометрии каната 3x3 по сравнению с триплетом, различие между аналитическими оценками и результатами прямого

КЭ моделирования увеличилось, но не превышает 6%. При изготовлении сверхпроводящей обмотки рассмотренные элементы кабеля 3x3 свиваются в элементы 3x3x5, имеющие третий порядок свивки. Аналитические оценки жесткостных характеристик канатов, представленные в упомянутой литературе, оказываются уже не применимыми к кабелям такой структуры, и основным методом исследования становится прямое конечно-элементное моделирование. Однако прямое конечно-элементное моделирование таких кабелей также осложнено неизвестностью точного пространственного расположения жил в кабеле. Этот факт становится очевидным если рассмотреть фрагмент геометрической модели такого кабеля, полученной исходя из предположения, что центральные линии нитей описываются винтовыми линиями третьего порядка – рис. 8в. В данной геометрической модели между жилами кабеля присутствуют пустоты, в то время как в реальности кабели при изготовлении обжимаются, и жилы

находятся в плотном контакте друг с другом. В работе предложен и реализован алгоритм построения модели кабелей сложной структуры с плотной упаковкой жил, основанный на решении вспомогательной задачи механического деформирования кабеля с идеализированной (построенной на основе многоуровневых винтовых линий) структурой с учетом контактного взаимодействия. Результат применения данного алгоритма к построению модели кабеля структуры $3 \times 3 \times 3 \times 5 + 3 \times 4$, получаемого путем свивки рассмотренных выше кабелей $3 \times 3 \times 5$ с добавлением сердечника 3×4 , представлен на рис. 11.

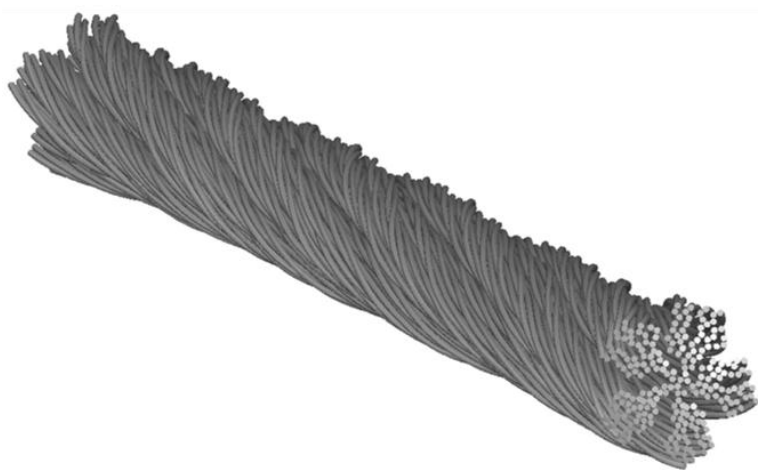


Рис. 11. Модель кабеля $3 \times 3 \times 5 \times 5 + 3 \times 4$ в обжатой конфигурации

С помощью разработанной КЭ модели в работе исследовано поведение кабеля $3 \times 3 \times 5 \times 5 + 3 \times 4$ при растяжении и кручении с учетом множественного пространственного контактного взаимодействия между всеми жилами. Следует отметить, что разработанные КЭ модели элементов кабеля магнитной системы ITER позволяют

исследовать их напряженно-деформированное состояние под действием любых нагрузок и на основе любых математических моделей материалов, а также описать любые локальные эффекты, так как основаны на конечно-элементном решении пространственных задач механики деформируемого твердого тела без применения каких-либо упрощающих гипотез.

Помимо задач растяжения и кручения кабелей, в работе представлены результаты применения разработанных моделей к описанию поведения элементов кабеля при поперечном сжатии. Этот вид напряженно-деформированного состояния возникает в кабелях, в частности, под действием электромагнитных нагрузок и представляет несомненный интерес, так как трение между жилами при таком нагружении кабеля может приводить к значительным тепловыделениям. Проведено многовариантное исследование поперечного сжатия кабелей 3×3 , $3 \times 3 \times 5$ и $3 \times 3 \times 5 \times 5 + 3 \times 4$. В прямом конечно-элементном моделировании использованы явная и неявная схемы интегрирования. Установлено, что для элементов кабеля сложной структуры (начиная от $3 \times 3 \times 5$) использование явной схемы интегрирования дифференциальных уравнений (и, соответственно, решение задачи в динамической постановке) предпочтительно из-за более высокой скорости сходимости численных результатов.

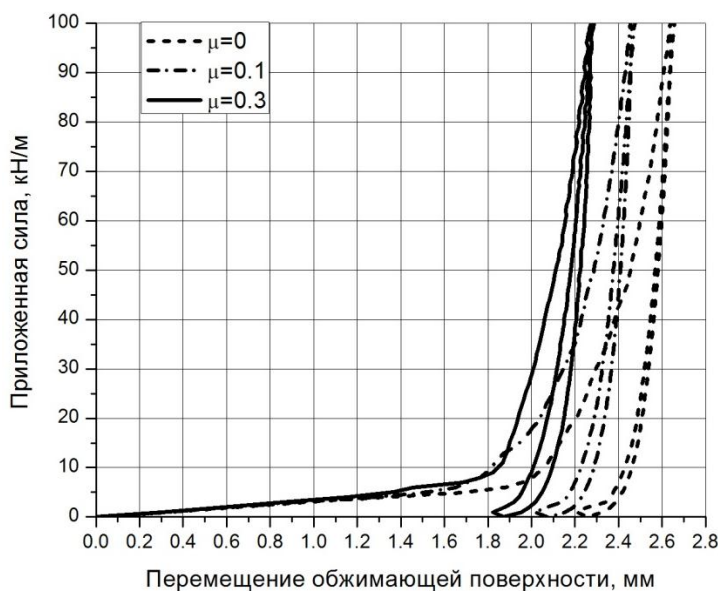


Рис. 12. Кривая нагружения, разгрузки и последующего нагружения для кабеля 3x3x5 при различном трении

Исследовано циклические нагружение и разгрузка при различных параметрах свивки, различных коэффициентов трения и различной скорости нагружения. На рис. 12 представлены графики зависимости вертикального перемещения обжимающей поверхности от приложенной силы при нагружении, разгрузке и последующем нагружении для различных значений коэффициента сухого трения μ между жилами для кабеля 3x3x5. Полученные результаты

подтверждают ожидаемый результат увеличения петли гистерезиса и уменьшения обжатия при увеличении коэффициента сухого трения между жилами кабеля.

В заключении отражены **основные результаты** диссертационной работы, которые могут быть сформулированы следующим образом:

1. Предложены и продемонстрированы подходы к расчету напряженно-деформированного состояния кабелей ITER с многоуровневой композитной структурой на различных уровнях – от микроуровня отдельных включений Nb_3Sn до уровня кабеля множественной свивки $3x3x5x5+3x4$.
2. На основе конечно-элементного решения задач теории упругости микронеоднородных тел для двухуровневой композитной структуры жилы кабеля ITER реализованы различные варианты методов гомогенизации и гетерогенизации.
3. Выполнено обобщение метода базовых решений на случай наличия температурных деформаций; представлено доказательство периодичности полей напряжений в базовых задачах.
4. Предложена и реализована методика двухуровневого восстановления микрополей на основе метода базовых решений в композитной структуре жилы кабеля ITER.
5. Разработаны пространственные геометрические и КЭ модели элементов кабеля магнитной системы тороидального поля ITER вплоть до структуры $3x3x5x5+3x4$. Адекватность разработанных моделей подтверждена хорошим совпадением результатов КЭ моделирования с аналитическими оценками в случаях, когда последние могут быть получены.
6. Выполнено многовариантное конечно-элементное моделирование и исследование механического поведения элементов кабеля при растяжении, кручении и поперечном сжатии в зависимости от различных геометрических и физических параметров.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

а) Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Немов, А.С. Расчетное определение жесткостных характеристик кабелей с иерархической структурой [Текст] / А.С. Немов, И.Б. Войнов, А.И. Боровков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №4. – С. 21–27.

2. Немов, А.С. Многоуровневая гомогенизация кабелей с иерархической композитной структурой [Текст] / А.С. Немов, А.И. Боровков, Б.А. Шрефлер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009.– № 3. – С.153 – 162.

3. Nemov, A. Generalized stiffness coefficients for ITER superconducting cables, direct FE modeling and initial configuration [Текст] / A.S. Nemov, D.P. Boso, I.B. Voynov, A.I. Borovkov, B.A. Schrefler // Cryogenics. – 2010. – Vol. 50. – Issue 5. – P.304 – 314.

б) Другие публикации:

1. Nemov, A. Finite Element Modeling of the ITER Superconducting Cables Mechanical Behavior Using LS-DYNA Code / A. Nemov, A. Borovkov, B. Schrefler // Proc. 7th European LS-DYNA Conference 2009 [Электронный ресурс] – 1 электрон. опт диск (CD-ROM).

2. Немов, А.С. Метод многоуровневой гомогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией. 1. Гомогенизация анизотропных сред [Текст] / А.С. Немов, А.И. Боровков // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – Часть V. – С. 49 – 50.

3. Немов, А.С. Метод многоуровневой гомогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией. 2. Процедура многоуровневой гомогенизации анизотропных сред [Текст] / А.С. Немов, А.И. Боровков // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – Часть V. – С. 51 – 52.

4. Немов, А.С. Метод многоуровневой гетерогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией [Текст] / А.С. Немов, А.И. Боровков // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – Часть V. – С. 53 – 54.

5. Nemov, A. Finite element simulation of the mechanical behaviour of multilevel composite iter cables / A. Nemov, A. Borovkov, D. Boso, B.a. Schrefler // Abstracts IV European Conference on Computational Mechanics ECCM 2010 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.eccm-2010.org/abstract_pdf/abstract_1355.pdf, свободный.

6. Немов, А.С. Многоуровневое конечно-элементное моделирование механического поведения композитных кабелей с иерархической структурой [Текст] / Немов А.С., Боровков А.И. // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы научно-практической конференции – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. – С. 176–179.