

## УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН Института  
машиноведения им. А.А.  
Благодурова Российской академии  
наук доктор технических наук,  
профессор В.А. Глазунов

« \_\_\_\_ »

2017 г.



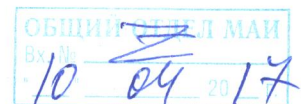
## ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им А. А. Благодурова Российской академии наук на диссертационную работу **Хамед Мемарианфард** на тему **«Двухуровневый метод в механике толстостенных намоточных оболочек из армированных полимеров (при их создании и эксплуатации)»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела» в диссертационный совет Д 212.125.05 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)».

### Общие сведения о диссертационной работе

На рассмотрение ведущей организации представлена диссертационная работа **Хамед Мемарианфард** объемом 157 страницы, включающая 114 рисунка, структурно подразделенная на введение, четыре главы, список литературы из 111 наименований, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.



Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Возможность создания монолитных толстостенных намоточных оболочек открывает широкие возможности их применения в перспективных областях техники. Например, в авиационной и космической, строительстве, нефте- и газодобывающей отраслях. Наглядными примерами таких элементов конструкций являются фюзеляж самолета, глубоководные аппараты, стойки шасси космических аппаратов, супербаллоны для хранения и транспортировки газов под большим давлением. Проблемой нарушения работоспособности толстостенных анизотропных оболочек является сохранение их технологической монолитности. Нарушение монолитности вызвано образованием кольцевых трещин в процессах отверждения и охлаждения полимерного композита. Естественной причиной этого являются растягивающие напряжения, формирующиеся на макро и микроуровнях структуры материала и особенностей геометрии такой конструкции. Для разработки надежных методов подавления подобных негативных процессов необходимо разрабатывать методы расчета и прогнозирования остаточных технологических напряжений не только на макро, но и на микроуровнях. В связи с вышеописанным данная работа представляется актуальной.

### **Новизна работы**

Большинство опубликованных работ, посвященных исследованию кинетики напряжений в толстостенных намоточных цилиндрах в процессе отверждения и охлаждения ограничено в основном, анализом макронапряжений в моделях анизотропной среды. Из-за сложности и неравномерности полей напряжений в микроструктуре композиционных материалов подавляющее большинство подходов опирается на модифицированные методы смеси для определения параметров



анизотропной среды. Однако такие подходы не позволяют детально описать реальные остаточные напряжения.

В рассматриваемой работе впервые предложен и применен нелинейный вычислительный многомасштабный алгоритм для прогнозирования поля температур, глубины отверждения и остаточных макронапряжений на макроуровне и локальных микронапряжений в микроструктуре (в представительном элементе) толстостенных намоточных цилиндрических оболочек в процессах отверждения и охлаждения. В качестве иллюстрации возможностей метода использовался разработанный подход для создания и последующего нагружения кокона высокого давления, состоящего из толстостенного анизотропного цилиндра и сферических титановых заглушек по торцам.

### **Цель диссертационной работы**

Цель данной диссертации является разработка и развитие нелинейного вычислительного многомасштабного алгоритма и метода расчета и прогнозирования остаточных макронапряжений и локальных микронапряжений в толстостенных намоточных оболочках из армированных полимеров в процессе их отверждения и охлаждения, с последующим применением развитого подхода к расчету кокона, находящегося под действием внешнего давления.

### **Практическая ценность работы**

Результаты диссертационной работы могут использоваться для прогнозирования кинетики напряженно-деформированного состояния толстостенных намоточных цилиндрических оболочек из армированных полимеров в процессах отверждения, охлаждения и эксплуатации на макро и микроуровне. Результаты этого исследования также можно использовать для прогнозирования остаточных технологических напряжений в макро- и микромасштабах в любых конструкциях из композиционного материала.

## Методология и методы исследования

При подготовке диссертации были использованы аналитические методы и современные нелинейные многомасштабные численные методы на основе метода конечных элементов.

## Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, и списка литературы.

В первой главе диссертационной работы проводится подробный обзор научной литературы по расчету остаточных напряжений и результатам экспериментальных исследований указанной проблемы. На основании анализа литературных данных обосновывается необходимость решения сформулированной выше задачи в связи с необходимостью создания монолитных толстостенных намоточных цилиндрических оболочек из армированного полимера. Наглядно отражены их преимущества по сравнению с аналогичными элементами из металлов и сплавов. Изложен ряд проблем, возникающих при создании толстостенных намоточных оболочек. В конце главы дан обзор работ, посвященных постановкам краевых задач и методам их решения. Представлены результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в модельных кольцевых образцах по оптимальному и стандартному режимам охлаждения.

Вторая глава содержит предложенные автором методы исследования, формулировки расчетных схем, разработку физико-математических моделей и вычислительного многоуровневого алгоритма для решения задач о напряженно-деформированном состоянии макро- и микроструктуры толстостенных композитов из армированных полимеров в процессе изготовления изделия. Разработан нелинейный численный многомасштабный (многоуровневый) метод решения для прогноза поля микронапряжений в контрольных зонах с использованием Представительного Объемного



Элемента (ПОЭ) или элементарной ячейки композита с периодическими граничными условиями.

Макроскопические деформации вычислялись с учетом упругого поведения материала для каждого шага времени. Затем, используя значения макродеформаций, были вычислены упругие деформации, деформации ползучести и полные деформации полимерной матрицы в ПОЭ. Далее, средние величины полных деформаций и напряжений в ПОЭ для интервала времени вычисляются по методу усреднения по объему ПОЭ. После вычисления полных деформаций и напряжений на ПОЭ в конце интервала времени формируется тензор модулей вязкоупругой матрицы. Отмечено, что в отличие от других работ, в этом алгоритме, все неупругие деформации (деформации ползучести и химической усадки) рассчитывают в ПОЭ. Следует отметить, что реализовать поставленную задачу, в силу сложности конфигурации, оказалось возможным только предложенным в работе методом.

В третьей главе в качестве приложения разработанного метода многоуровневого расчета напряженно – деформированного состояния моделируется кокон внутренний и внешний радиусы 1000 и 1350 мм соответственно, предназначенный для работы в условиях высокого давления (намоточный толстостенный цилиндр с полусферическими заглушками по торцам из титана). Начиная с внутреннего слоя, проводилась намотка слоев  $[90_4/0_2]$  на цилиндрическую оправку до необходимых размеров. В расчете предполагалось, что между цилиндром и заглушками существует идеальный контакт (условия непрерывности перемещений и вектора напряжений).

Выполнен расчет неупругих деформаций порождающих остаточные температурные макро- и микронапряжения намоточного цилиндра из стеклопластика на стадии отверждения и охлаждения в зависимости от времени и температуры и в условиях внешних воздействий. Поля микронапряжений на каждом этапе вычисляются в ПОЭ в трех различных зонах по толщине цилиндра, во внутренней, внешней и в середине.

Проведенное сравнение результатов вычисления остаточных напряжений в модельных кольцевых образцах с экспериментально измеренными значениями показало их удовлетворительное согласие.

В результате произведен полный многоуровневый расчет кинетики напряженно-деформированного состояния указанного кокона в процессе изготовления и при действии механической нагрузки (вызываемой внешним давлением воды погружаемого глубоководного аппарата) с использованием разработанного вычислительного алгоритма.

Четвертая глава содержит выводы и обсуждение полученных результатов, в сопоставлении с результатами исследований других авторов.

### **Основные результаты, полученные в диссертационной работе**

1. Расчет остаточных напряжений в процессе охлаждения, выполненный с помощью дискретной модели (многослойный цилиндр, в котором чередуются тонкие слои стекла и полимера) однонаправленного намоточного цилиндра показал, что радиальные напряжения превышают напряжения в соответствии с расчетом по модели ортотропной сплошной среды.

2. Разработан нелинейный численный многомасштабный (многоуровневый) метод решения прогнозирования напряженно-деформированного состояния в толстостенных намоточных оболочках из армированных полимеров на макро– и микроуровне.

3. Показано что физически нелинейное определяющее соотношение Максвелла – Гуревича с успехом может быть использовано для описания механического поведения гомогенных и армированных полимеров.

4. Использование двухмасштабного анализа остаточных напряжений показало, что величина микронапряжений, в некоторых зонах ПОЭ, в несколько раз превышает макронапряжения в этих зонах.

5. Показано, что для кокона под действием внешнего давления,



остаточные технологические напряжения являются благоприятными, так как компенсируют часть механических радиальных и окружных напряжений при эксплуатации.

### **Замечания по диссертационной работе**

- 1) Условия идеального адгезионного контакта между волокном и матрицей, используемые в ПОЭ не в полной мере соответствуют реальности. На самом деле между волокном и матрицей формируется контактный слой, имеющий собственные механические свойства.
- 2) Из текста не совсем ясно, почему в работе используется термин «толстостенный намоточный кокон». Не совсем ясно, о каких толщинах оболочки идет речь? Целесообразно указать, сколько слоев однонаправленного материал и какова структура армирования поперечного пакета оболочки.
- 3) Не проведено сравнение экспериментальных данных по остаточным напряжениям с теоретическими результатами, полученными автором.
- 4) Автор предлагает ПОЭ, для которого в ходе прямых преобразований формирует тензор модулей вязкоупругости матрицы, решена прямая задача, при этом отсутствует решение обратной задачи. Не вполне ясно, как влияет нелинейная микроструктура на макрофизические характеристики всей ортотропной оболочки.
- 5) В тексте встречаются опечатки, которые в ряде случаев искажают смысл решаемых задач.

### **Заключение**

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 7 работах, 3 из них опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК; и, 2 статьи опубликованы в зарубежном журнале, входящем в список, индексируемых в SCOPUS и ISI (Web of Science).

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

В целом, работу следует оценить положительно. Диссертация Хамед Мемарианфард соответствует всем критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Хамед Мемарианфард, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв на диссертационную работу Хамед Мемарианфард подготовил заведующий лабораторией механики композиционных материалов ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор Думанский А.М.

Заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией механики композиционных материалов ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», д.ф.-м.н., профессор

Думанский А.М.

Отзыв обсужден и единогласно утвержден на заседании отдела "Конструкционное материаловедение" Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (протокол № 7 от 23 ноября 2016 г.).

Заведующий отделом «Конструкционное материаловедение» ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», д.т.н., профессор

Романов А.Н.

Адрес: 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4;  
Тел.: +7(495) 628-87-30, факс: +7(495)624-98-63, e-mail: [info@mash.ru](mailto:info@mash.ru)