

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Белорусского государственного университета

А.В.Блохин

«29» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
о диссертации **Федотова Дениса Александровича**
«Напряженное состояние цилиндрических композитных оболочек с учетом влияния кинетики полимеризации связующего и параметров намотки», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утверждённого ВАК.

По совокупности поставленных целей и решаемых задач содержание диссертационной работы соответствует специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела (технические науки). Область исследования согласуется со следующими пунктами паспорта специальности, утверждённого ВАК:

п. III. 1 – Общая теория моделей деформируемых сред;

п. III. 9 – Экспериментальные методы исследования деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазово-структурные превращения при внешних воздействиях.

Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости.

Целью работы является применение свойств препрегов для исследования напряжений в цилиндрических оболочках в условиях производства.

Теоретические и экспериментальные исследования, представленные в работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. На всех этапах теоретических и экспериментальных исследований соискатель проводил эксперименты, осуществлял поиск и анализ исходных данных, проводил численные исследования, анализировал и обобщал полученные результаты. Основные положения, выводы и рекомендации, принадлежат автору. Научное направление, цель, задачи и методология разработаны совместно с научным руководителем. Проведённое автором исследование имеет научную новизну и практическую значимость.

Научный вклад соискателя:

1. Разработана механико-математическая модель и метод расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек в состоянии препрега при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента. Такой метод основан на разделении деформаций компонент препрега в условии их совместности, что позволило оценить остаточные напряжения с учетом полимеризации связующего, температурного градиента, параметров намотки.

2. Выполнен расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего и температурных напряжений с использованием структурной неоднородности композитного материала.

3. Решена задача о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации или при охлаждении на напряженное состояние в цилиндрическом препреге. Показано, что усадка связующего при его полимеризации и охлаждении цилиндрического композита влияет на величину механических характеристик, связывающих линейно напряжения и деформации композита, функциональные зависимости для которых имеют связь с механическими характеристиками связующего и наполнителя. При этом полученные выражения в виде формул для расчета механических характеристик композита отличаются от классических, если изменение объема полимера не равно изменению объема наполнителя в процессе трансформации композита.

4. Разработан метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости материала цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении. Это позволило использовать его в формулах для расчета остаточных напряжений.

5. Приведены результаты тензометрирования цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления. Показано, что радиальные перемещения и вызывающая их нагрузка находятся в линейной зависимости. При этом по результатам обработки экспериментальных исследований установлено, что модуль упругости препрега в радиальном направлении не зависит ни от толщины, ни от температуры препрега. По результатам тензометрирования цилиндрической оболочки из композита установлено, что в процессе ее разогрева изменение относительного удлинения в кольцевом направлении следует рассматривать в пределах температурных интервалов: (20, 60) °С, (60, 100) °С и (100, 160) °С. На первом температурном интервале относительное удлинение увеличивается за счет нагревания препрега и уменьшается вследствие процессов, происходящих при завершении пропитки связующим армирующего материала. На втором участке изменения температуры препрега относительное удлинение осуществляется только за счет тем-

пературных деформаций. Третий участок характеризуется изменением деформации за счет химической усадки при полимеризации связующего.

Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая учёная степень.

Таким образом, диссертация Федотова Дениса Александровича представляет собой завершённую научную работу, отвечающую требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, а ее автор заслуживает присуждения ей искомой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела за:

1) механико-математическую модель и метод расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек в состоянии препрега при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента;

2) методику расчета напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего и температурных напряжений с использованием структурной неоднородности композитного материала;

3) метод решения задачи о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации или при охлаждении на напряженное состояние в цилиндрическом препреге с доказательством утверждения, что усадка связующего при его полимеризации и охлаждении цилиндрического композита влияет на величину механических характеристик, связывающих линейно напряжения и деформации композита, функциональные зависимости для которых имеют связь с механическими характеристиками связующего и наполнителя;

4) метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости материала цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении и проведение тензометрирования цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления.

Новизна полученных результатов заключается в:

– исследовании напряженного состояния композита на всех этапах изготовления изделий в форме тела вращения, к которому привел основной вид нагружения, действующий во время рассматриваемой технологической операции с разделением этапа полимеризации на две стадии: на первой – связующее находится в жидком состоянии, на второй – связующее обладает свойствами твердого тела с целью определения напряженного состояния на каждом из них;

– в методе расчета напряжений в композиционном материале цилиндрических оболочек при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента в процессе охлаждения с использованием структурной неоднородности композитного материала, связанной условиями совместности деформаций связующего и наполнителя с экспериментальным подтверждением соответствующих методов определения напряжений, возникающих при полимеризации связующего и охлаждении композита.

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, использованы при выполнении проекта по производству дымовых труб, предназначенных для заводов по термическому обезвреживанию твердых отходов на стадии расчета прочности конструкции (акт о внедрении приведен в приложении к диссертации).

Замечания по диссертации.

1. На странице 53 в п. 3.1 «Установление зависимости влияния усадки связующего в жидком состоянии при полимеризации на изменение напряженного состояния» отмечено, что на протяжении всего технологического процесса происходят существенные изменения физико-механических свойств композита. Применение к такому материалу единой реологической модели исключено. Инженерный метод заключался в том, что для каждого этапа механическое поведение описывается одним законом. При этом на стыках стадии имеет место скачкообразное изменение характеристик. В качестве замечания может быть сформулирован вопрос, касающийся объяснения скачкообразного изменения характеристик.

2. На странице 71 в выводах по содержанию главы 3 сказано, что решена задача об определении изменения напряжений и перемещений в цилиндрической оболочке ранее сформированной из препрега в результате намотки на нее с постоянным натяжением нескольких слоев ткани. Это позволило установить закономерность (3.37) между натяжением ткани и радиальным перемещением в цилиндрическом препреге. К замечанию следует отнести отсутствие графической наглядной иллюстрации, поясняющей содержание формулы (3.37).

3. Решается осесимметричная задача, следовательно, последнее уравнение в системах (3.9), (3.28), (5.8) - обыкновенное дифференциальное уравнение, а не уравнение в частных производных.

4. Некорректно записано, что решается система (3.9). Это система состоит из трех уравнений (двух алгебраических и одного дифференциального), в которую входят только две неизвестные величины – напряжения в радиальном и кольцевом направлении. На самом деле автор решает либо

2 первых уравнения, либо дифференциальное уравнение с учетом некоторого условия. Такое же замечание относится и к системе (3.28).

Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует.

Научная квалификация Федотова Д.А. соответствует учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Рекомендации по практическому применению полученных результатов.

С практической точки зрения результаты могут быть рекомендованы для использования в расчетах напряженно-деформированного состояния в композитах, при проектировании новых изделий на основе цилиндрических и других осесимметричных оболочек. Расчет напряжений по представленной механико-математической модели при температурных и химических усадках связующего позволил определить оптимальный режим полимеризации и снизить толщину конструкционного слоя, тем самым получить экономический эффект.

Согласно приказу ректора № 648-ОД от 15.11.2023 отзыв заслушан и утвержден на заседании научного семинара кафедры теоретической и прикладной механики и кафедры био- и наномеханики (протокол № 4 от 22.11.2023), на котором соискатель Д.А.Федотов выступил с научным докладом и дал полные, исчерпывающие ответы на заданные вопросы. На заседании присутствовали 4 доктора наук и 5 кандидатов наук (д. ф.-м. н. проф. Журавков М.А.; д. ф.-м. н. проф. Чигарев А.В.; д. тех. н. доц. Богданович А.В.; д. пед. н., к. ф.-м. н. доц. Медведев Д.Г.; к. ф.-м. н. доц. Конон П.Н.; к. ф.-м. н. доц. Докукова Н.А.; к. ф.-м. н. доц. Протопопов Б.Е.; к. ф.-м. н. доц. Ботогова М.Г.; к. ф.-м. н. Черный А.Д.; ст. преп. Нагорный Ю.Е.; ст. преп. Никитин А.В., ассистент Авдейчик Е.В.; зав. НИЛ Николайчик М.А.).

Результаты открытого голосования: «за» – 9, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель семинара
д. физ-мат. наук профессор



М.А.Журавков

Эксперт
д. физ-мат. наук профессор



А.В.Чигарев

Секретарь научного семинара
к. физ-мат. наук доцент



М.Г.Ботогова

5

Отзыв поступил
Совету 01.12.23
Чигарев П.И.