

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** 24.2.327.07

**Соискатель:** Малахов Андрей Викторович

**Тема диссертации:** Моделирование полимерных композитных материалов с неоднородной структурой армирования на основе криволинейных траекторий волокон

**Специальность:** 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:** на заседании «05» июня 2024 года, протокол №3, диссертационный совет пришел к заключению о том, что диссертационное исследование Малахова А.В. является законченной научно-квалификационной работой, имеет важное прикладное значение и содержит элементы фундаментального исследования. Достоверность полученных результатов обоснована и сомнений не вызывает.

Диссертация Малахова А.В. отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842. На заседании «05» июня 2024 года, протокол №3, диссертационный совет принял решение присудить Малахову А.В. ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** председатель диссертационного совета Тарлаковский Д.В., заместители председателя диссертационного совета Земсков А.В., Фирсанов В.В., ученый секретарь диссертационного совета Сердюк Д.О.

**Члены диссертационного совета:** Булычев Н. А., Дмитриев В. Г., Медведский А. Л., Меркурьев И. В., Рабинский Л. Н., Солдатенков И. А., Федотенков Г. В.

Председатель  
диссертационного совета 24.2.327.07  
д.ф.-м.н., профессор

Тарлаковский Д.В.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.07  
к.т.н., доцент

Начальник  
Т.А. Аникин



Сердюк Д.О.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.07,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «05» июня 2024 г. № 3

О присуждении Малахову Андрею Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Моделирование полимерных композитных материалов с неоднородной структурой армирования на основе криволинейных траекторий волокон» по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела», принята к защите «18» марта 2024 г., протокол № 2, диссертационным советом 24.2.327.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. Приказ о создании диссертационного совета 24.2.327.07 – № 1184/нк от «12» октября 2022 г.

Соискатель Малахов Андрей Викторович, 20 ноября 1982 года рождения, в 2006 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет «МАМИ»» по специальности «Динамика и прочность машин». В 2012 году Малахов Андрей Викторович окончил

аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук.

Работал с 2011 г. по 2022 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук младшим научным сотрудником, научным сотрудником. В настоящее время работает инженером-конструктором 2 категории в АО «Туполев» и по совместительству научным сотрудником в лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук.

Научный руководитель – **Полилов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

**Горбачев Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика композитов» Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва,

**Сапожников Сергей Борисович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Техническая механика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск,

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва** в своем положительном отзыве, подписанным доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики» Российской академии наук **Мовчаном Андреем Александровичем** и утверждённым директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики» Российской академии наук доктором технических наук Власовым Александром Николаевичем указала, что диссертация Малахова Андрея Викторовича представляет собой законченную квалификационную работу, в которой применительно к композитным пластинам содержится решение ряда новых задач, имеющих большое значение для развития механики деформируемого твёрдого тела.

Диссертация соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор, Малахов Андрей Викторович, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе, 12 и 13 из них - в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования SCOPUS и WoS, соответственно, 2 научные статьи в русскоязычных (и переводных) изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Малахов, А. В. Построение траекторий волокон, огибающих отверстие, и их сравнение со структурой древесины в зоне сучка / А. В.

Малахов, А. Н. Полилов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 4. – С. 57–62.

2. Malakhov, A. V. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres using FEM / A. V. Malakhov, A. N. Polilov // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Vol. 87. – P. 23–28. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.04.005

3. Sugiyama, K. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber / K. Sugiyama, R. Matsuzaki, A. V. Malakhov, A. N. Polilov, M. Ueda, A. Todoroki, Y. Hirano // Composites Science and Technology. – 2020. – Vol. 186. – 107905. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107905

4. Malakhov, A. V. A modeling method of continuous fiber paths for additive manufacturing (3D printing) of variable stiffness composite structures / A. V. Malakhov, A. N. Polilov, J. Zhang, Z. Hou, X. Tian // Applied Composite Materials. – 2020. – Vol. 27. – P. 185–208. DOI: 10.1007/s10443-020-09804-8

5. Hou, Z. A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content / Z. Hou, X. Tian, Z. Zheng, J. Zhang, L. Zhe, D. Li, A. V. Malakhov, A. N. Polilov // Composites Part B: Engineering. – 2020. – Vol. 189. – 107893. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107893

6. Malakhov, A. V. Increasing the bearing capacity of composite plates in the zone of bolted joints by using curvilinear trajectories and a variable fiber volume fraction / A. V. Malakhov, A. N. Polilov, D. Li, X. Tian // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57. – P. 287–300. DOI: 10.1007/s11029-021-09954-1

7. Malakhov, A. V. Three-dimensional printing of biomimetic variable stiffness composites with controlled orientations and volume fraction of fibers / A. V. Malakhov, X. Tian, Z. Zheng, T. P. Plugatar, Y. Huang, N. A. Tatus', D. Li // Composite Structures. – 2022. – Vol. 299. – 116091. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116091

В этих и остальных работах приведены математические постановки новых задач механики деформируемого твёрдого тела применительно к композитным пластинам с криволинейным армированием. Вклад в публикации, выполненные в соавторстве, состоит в участии в постановке задач, разработке методов их исследования и решения, а также в выполнении численных расчетов и анализе их результатов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от ведущей организации и официальных оппонентов, отзывы положительные;

от доктора технических наук, главного научного сотрудника АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» Азарова Андрея Валерьевича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» Скворцова Аркадия Алексеевича, отзыв положительный;

от кандидата технических наук, заместителя директора по научной работе Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, старшего научного сотрудника сектора новых материалов и технологий Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук Каманцева Ивана Сергеевича, отзыв положительный.

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

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики» Российской академии наук имеются следующие замечания.

1. В работе не проводилось исследование по критерию представительности объема для конечного элемента. В этой связи не ясно, достаточно ли в минимальном конечном элементе волокон для корректности усреднения.

2. Необходимо пояснить и обосновать используемую в работе модель взаимодействия болта и окружающего болт композиционного материала.

3. При моделировании криволинейных траекторий волокон не указывается было ли выполнено условие непрерывности количества волокон «сколько вошло – столько вышло». Каким образом обеспечивается выполнение этого условия при произвольном назначении и изменении расстояния между волокнами?

4. Следует пояснить используемую в работе модель деградации свойств материала. Накопления рассеянных повреждений в деформируемых твердых телах сводится к зарождению, развитию и объединению микродефектов. Этот процесс описывается, как правило, путем введения параметра повреждаемости и формулировке эволюционного уравнения для этого параметра. В данной работе вместо этого вводятся коэффициенты деградации, свои для каждого модуля. Необходимо разъяснить, как работает эта модель?

5. В приведенной в тексте диссертации таблице 3.2 для разрушения матрицы рассматриваются только случаи разрушения при растяжении и сжатии. Почему не рассматривается часто реализуемый вариант разрушения матрицы при сдвиге?

6. Литературный обзор можно было бы дополнить, упомянув в работе результаты В.В. Васильева, внесшего вклад в развитие методов моделирования композитных материалов с криволинейным армированием.

Замечания в отзыве официального оппонента Горбачева В.И.

1. На странице 25 диссертации написано, что «Для анализа напряженно-деформированных состояний в композитных материалах приходится использовать определяющие соотношения» А как по-другому?

2. Формулы (2.25) на странице 31 представляют собой эффективные свойства по Фойхту и Рейссу. Они образуют вилку Фойхта-Рейсса, внутри которой располагаются истинные эффективные модули, учитывающие кроме объемных долей форму и расположение волокон. В диссертационной работе эффективный модуль вдоль волокон взят по Фойхту, а эффективный модуль поперек волокон – по Рейссу.

Замечания в отзыве официального оппонента Сапожникова С.Б.

1. К сожалению, в обзоре автор обошел своим вниманием многочисленные работы отечественных авторов, рассматривавших проблемы криволинейной укладки волокон в композитных конструкциях (Г.И. Брызгалин, В.А. Комаров и др.), приведя в тексте лишь их фамилии для формальности.

2. Основным материалом для дальнейших расчетов принят известный композит на основе углеродных волокон IM7 и термореактивной (эпоксидной) матрицы типа 8552 с объемной долей волокон около 60%, тогда как при 3D-печати использован совсем другой материал – пучок арамидных волокон с матрицей из термопласта PLA – с объемной долей волокон до 40%.

3. Дискуссионным является также факт приведения отличающихся в 5-6 раз модулей упругости при растяжении и сжатии вдоль волокон (Табл.5.1). Нет ссылки на источник данной недостоверной информации.

В отзывах на автореферат следует отметить такие критические замечания.

1. Из автореферата не ясно, оценивался ли экономический эффект при переходе от однонаправленного армирования на криволинейное.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в данной области, а ведущая

организация проводит исследования в области деформирования и разрушения композитных элементов конструкций. Официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации имеют значительное количество публикаций, связанных с направлением исследований диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** постановки и методы решения новых задач для композитных пластин;

**предложены** новые подходы к построению и реализации численно-аналитических алгоритмов, основанных на методе конечных элементов;

**доказана** перспективность идей, изложенных в диссертации, применительно к решению задач механики деформируемого твердого тела;

**Новые понятия** не вводились.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны** правомерность и обоснованность предложенных методов решения задач для композитных пластин;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс методов, в том числе, методы механики деформируемого твердого тела, метод деградации свойств материала, метод конечных элементов;

**изложены** и доказаны утверждения, позволяющие использовать разработанный метод моделирования композитных материалов с криволинейным армированием применительно к решению задач для композитных пластин;

**раскрыто** существование проблемы корректности решения статических задач;

**изучены** статические задачи для композитных пластин с различными концентраторами напряжений;

**проведена модернизация численно-аналитических методов и алгоритмов решения статических задач применительно к композитным пластинам.**

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны** методы моделирования композитных пластин переменной жесткости с учетом изменения ориентации волокон и расстояния между ними, а также модифицирован метод деградации свойств материала применительно к криволинейным системам армирования;

**определены** коэффициенты концентрации напряжений для композитных пластин переменной жесткости при различных граничных условиях, а также несущая способность пластин, напечатанных на 3D принтере;

**созданы** новые эффективные методы моделирования композитных пластин с криволинейным армированием;

**представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию моделирования и изготовления композитных пластин переменной жесткости.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**теория** построена на методе конечных элементов, метод решения математически строг и непротиворечив, реализованные алгоритмы исследованы на сходимость, приведено сравнение численных и экспериментальных результатов;

**идея базируется** на использовании траекторий волокон при моделировании композитных материалов с криволинейным армированием и на основе построенных траекторий формируются неоднородные поля ориентаций и объемной доли волокон;

**использованы** сравнения полученных результатов с результатами других авторов, а также сравнения численных и экспериментальных результатов, полученных с помощью метода конечных элементов и при испытаниях на растяжение композитных пластин;

**установлено** качественное и количественное согласие численных и экспериментальных результатов, полученных при испытаниях на растяжение композитных пластин переменной жесткости и при их численном моделировании;

**использованы** современные методы математического моделирования, информационные и компьютерные методы визуализации полученных результатов.

**Личный вклад соискателя состоит** в самостоятельной проработке литературы по теме исследования, разработке метода моделирования криволинейных траекторий волокон и композитных структур на их основе, а также в реализации метода анализа прогрессирующего разрушения, проведении численных расчётов, обработке численных и экспериментальных результатов и написании научных статей. Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями. При выполнении работ по теме диссертации, опубликованных совместно с научным руководителем и соавторами, диссертант принимал участие в качестве исполнителя и руководителя в целом ряде научных работ по различным проектам: РФФИ №12-08-31232 мол\_а (2012-2013 гг.), № 15-08-01472 А (2015-2017 гг.), № 18-08-00372 А (2018-2020 гг.), № 18-58-53020 ГФЕН\_а (2018-2019 гг.), Национальная программа исследований и разработок Китая № 2018YFE0207900 (2020-2022 гг.). Соискатель опубликовал основные результаты в рецензируемых научных журналах. Полученные результаты работы были доложены автором на отечественных и международных конференциях.

В ходе защиты диссертации не было высказано принципиальных критических замечаний. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании «05» июня 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Малахову Андрею Викторовичу ученую степень кандидата технических наук за решение новой задачи, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 4 докторов технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела», участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 11, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета 24.2.327.07

д.ф.-м.н., профессор

Тарлаковский Д.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.07

к.т.н., доцент

Сердюк Д.О.

«05» 06 2024 года

Начальник отдела ДС МАИ

Т.А. Ан

