

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19.12.2019 № 47

О присуждении Струнгарь Елене Михайловне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений» по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 17.10.2019, протокол № 43, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Струнгарь Елена Михайловна 1990 г. рождения, в 2015 г. окончила ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет по направлению «Материаловедение и технологии материалов». В 2019 г. окончила аспирантуру очной формы обучения Пермского национального исследовательского политехнического университета по направлению 01.06.01 – «Математика и механика» (научная специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»). В настоящее время работает младшим научным сотрудником Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ). Диссертация выполнена на кафедрах «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» и «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВО ПНИПУ.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение», директор Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ Вильдеман Валерий Эрвинович.

Официальные оппоненты:

1. Панин Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук" (г. Томск);
 2. Пантелеев Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – "Институт механики сплошных сред УрО РАН") (г. Пермь);
- дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет" (СамГТУ), г. Самара, в своем положительном заключении, составленном Радченко Владимиром Павловичем, д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО СамГТУ, и утвержденном проректором по научной работе ФГБОУ ВО СамГТУ, д.т.н., профессором М.В. Ненашевым, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность научных исследований можно классифицировать как разработку новых и модификацию известных методов экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения композитных материалов различной структуры, в том числе с технологическими дефектами, в условиях стохастической неоднородности полей деформаций. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела. Представленная диссертационная работа «Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений» удовлетворяет критериям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Струнгарь Елена Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Соискателем опубликовано 13 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Третьякова Т.В., **Спаскова (Струнгарь) Е.М.** Экспериментальное исследование напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2013. № 2. С. 186-198.

Рассмотрено получение экспериментальных данных, необходимых для построения критериев прочности с помощью видеосистемы и метода корреляции цифровых изображений. Проведен анализ конфигурации неоднородных полей деформаций в образцах с концентраторами.

2. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., **Спаскова (Струнгарь) Е.М.**, Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2015. № 4. С. 159-170.

Получены опытные данные по оценке влияния дефектов на остаточную прочность конструктивно-подобных элементов конструкций из композитов. Проведена оценка несущей способности крупноячеистых панелей с повреждениями при циклических и квазициклических воздействиях.

3. Anoshkin A.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S., **Spaskova (Strungar) E.M.**, Shardakov I.N., Shipunov G.S. Measurement of inhomogeneous

strain fields by fiber optic sensors embedded in a polymer composite material // Mechanics of Solids. 2016. Vol. 51, № 5. P. 542-549.

Показано, что использование видеосистем трехмерного анализа полей перемещений и деформаций позволяет выработать рекомендации по расположению и калибровке встроенных волоконно-оптических датчиков, а также провести оценку чувствительности к режимам нагружения.

4. Wildemann V.E., **Spaskova (Strungar) E.V.**, Shilova A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation problems of deformation and fracture in materials and structures // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 243. P. 163-170.

Рассматриваются методические вопросы применения метода корреляции цифровых изображений, с помощью которого анализировалась эволюция неоднородных полей деформаций на поверхности углепластиковых пластин с круглым отверстием. Показано влияние заданных параметров постобработки на характер распределения полей деформаций.

5. Староверов О.А., **Струнгарь Е.М.**, Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Особенности экспериментальных исследований трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 104-114.

Рассмотрены методические особенности применения метода корреляции цифровых изображений при экспериментальных исследованиях трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния.

6. Matveenkov V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., **Spaskova (Strungar) E.M.**, Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // Struct Control Health Monit. 2017; e2118. <https://doi.org/10.1002/stc.2118>.

Рассмотрено совместное использование встроенных волоконно-оптических датчиков деформации на брэгговских решетках и оптической видеосистемы при многократном растяжении/сжатии образцов композиционных материалов.

7. **Spaskova (Strungar) E.M.**, Wildemann V.E. Analysis of possible registration of inhomogeneous deformation fields in composite plates with technological defects // International Digital Imaging Correlation Society [Electronic resource]. 2017. P. 133-136.

Представлены методические рекомендации для анализа закономерностей механического поведения материалов в зонах технологических дефектов.

8. Вильдеман В.Э., **Струнгарь Е.М.**, Лобанов Д.С., Воронков А.А. Оценка работоспособности внедренных в композитный материал волоконно-оптических датчиков с использованием данных цифровой оптической видеосистемы анализа деформаций // Дефектоскопия. 2018. №1. С. 65-71.

Проведены исследования при совместном использовании метода корреляции цифровых изображений и волоконно-оптических датчиков при сложных режимах с выдержками на гладком образце и на образце с вырезом.

9. Wildemann V.V., Tretyakova T.V., **Strungar E.M.**, Tretyakov M.P. Deformation and failure of carbon fiber composite specimens with embedded defects during tension-torsion test // Frattura ed Integrità Strutturale. 2018. Vol. 12, № 46. P. 295-305.

Проведен анализ эволюции картин полей деформаций для оценки развития дефектов в композитных образцах. Предложена методика исследования влияния дефектов на остаточную прочность элементов конструкций из композитов на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур.

10. Третьякова Т.В., Душко А.Н., **Струнгарь Е.М.**, Зубова Е.М., Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 173-183.

Проведен анализ численных алгоритмов обработки экспериментальных данных при использовании метода корреляции цифровых изображений. Предложены рекомендации по выбору параметров расчета при анализе неоднородных полей перемещений и деформаций в композитных изделиях с учетом структурной неоднородности.

11. Babushkin A.V., Babushkina A.V., **Strungar E.M.**, Staroverov O.A., Lobanov D.S., Temerova M.S., Feklistova E.V. Phenomenological characteristics structural features research obtained at fibrous plastics standard tests // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 17. P. 658-665.

Предложены рекомендации по получению и математической обработке экспериментальных данных для определения механических характеристик композитов при сдвиге с использованием бесконтактной оптической видеосистемы.

12. **Strungar E.M.**, Feklistova E.V., Babushkin A.V., Lobanov D.S. Experimental studies of 3D woven composites interweaving types effect on the mechanical properties of a polymer composite material // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 17. P. 965-970.

Получены результаты экспериментального исследования влияния концентраторов на механическое поведение образцов углепластиков на основе ряда различных пространственных армирующих каркасов.

13. Вильдеман В.Э., **Струнгарь Е.М.**, Лобанов Д.С., Зубова Е.М. Исследование развития технологического дефекта в конструкционном углепластике методами корреляции цифровых изображений и акустической эмиссии в условиях сложнапряженного состояния // Дефектоскопия. 2019. №9. С. 3-10.

Исследованы процессы деформирования и накопления повреждений в слоистых композитных объектах с предварительно заложенными дефектами.

Публикации содержат в сумме 118 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Панина С.В. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о необходимости вынесения промежуточных данных по подбору параметров построения векторных полей в качестве научного результата;

- пожелания к написанию положений, выносимых на защиту;
- наличие отдельных неудачных формулировок в тексте диссертации;
- замечание по поводу терминологических неточностей в работе;
- замечание об очевидности вывода о преимуществе использования видеосистемы по сравнению с тензорезисторами;
- пожелание к написанию выводов по работе.

2. Положительный отзыв официального оппонента Пантелеева И.А. В отзыве отмечено, что в диссертации установлены новые и подтверждены предсказанные ранее закономерности деформирования и разрушения образцов слоисто-волоконистых композиционных материалов. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание об отсутствии дополнительной информации о распределении компонент вектора перемещений и тензора деформаций в третьем направлении;
- вопрос о причинах смещения максимума деформаций от границы отверстия для некоторых структур;
- пожелание по поводу указания в тексте диссертации рабочего диапазон сжимающих деформаций при использовании волоконно-оптических датчиков.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в области анализа закономерности формирования полей деформаций, процессов накопления повреждений, кинетики дефектов, влияния текстуры на прочностные характеристики композиционных материалов. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и практическую значимость, использованы в учебном процессе по двум дисциплинам магистерской подготовки, внедрены на ПАО "ОДК-Сатурн". Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- вопрос об измерении деформации на поверхности и внутри детали в пятой главе;
- замечание об отсутствии информации о том, в соответствии с какими опубликованными работами соискателя излагается материал определенной главы;
- замечание о сбое нумерации в главе 2, отсутствие пояснений к результатам, представленным на рис 2.3-2.5 (стр. 34);
- вопрос о необходимости пояснения величин, используемых при установлении соответствия изображений в программном обеспечении видеосистемы (стр. 37);
- вопрос о проверке точности видеосистемы на заданной базе в пункте 2.4 (стр. 46, 47).
- вопрос о разных скоростях нагружения для однотипных образцов в разных частях работы;
- вопрос о решении краевой задачи в пункте 3.3, пояснение к выбору материала;
- вопрос о принципе залечивания дефекта в главе 4;
- замечание по поводу опечаток и неточностей в тексте (на стр. 96 вместо ссылки на рис. 3.38 должна быть ссылка на рис. 3.39, на стр. 110 вместо рис. 10 должно быть 4.10, сбой в нумерации рисунков в главе 5: отсутствуют номера и рисунки 5.4 и 5.5). Отсутствие описания к величине в формуле (5.1).

На автореферат поступило 8 отзывов:

1. Положительный отзыв от Кургузова В.Д., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории механики разрушения материалов и конструкций ФГБУН

"Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН", г. Новосибирск (без замечаний);

2. Положительный отзыв от Ломакина Е.В., член-корреспондента РАН, д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теории пластичности ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва (без замечаний);
3. Положительный отзыв от Митюшова Е.А., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры теоретической механики Института фундаментального образования ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина", г.Екатеринбург (без замечаний);
4. Положительный отзыв от Полилова А.Н., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника, и.о. заведующего лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций, и Татуся Н.А., к.т.н., старшего научного сотрудника ФГБУН "Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН", г. Москва (3 замечания).
5. Положительный отзыв от Смирнова С.В., д.т.н., старшего научного сотрудника, директора ФГБУН "Институт машиноведения УрО РАН", г. Екатеринбург (2 замечания);
6. Положительный отзыв от Степановой Л.В. д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры математического моделирования в механике ФГАОУ ВО "Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева", г.Самара (3 замечания);
7. Положительный отзыв от Шлянникова В.Н., д.т.н., профессора, руководителя научного направления "Энергетика", ФГБУН ФИЦ Казанский научный центр РАН, г. Казань (1 замечание);
8. Положительный отзыв от Скрипняка В.А., д.ф.-м.н., профессора, зав. кафедрой механики деформируемого твердого тела, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск (1 замечание).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- в тексте автореферата не обсуждается механическая модель накопления повреждений и запаздывающего разрушения, допущена опечатка в формуле стр. 11;
- замечания об отсутствии пояснений некоторых величин: X на стр. 8, k и U на стр. 14, индекс m на рис. 3 (стр. 10);
- пожелание по написанию утверждения на стр. 12;
- пожелание привести в автореферате дополнительную информацию о зоне повреждения и методе численного анализа на стр. 13;
- вопрос о необходимости пояснения несимметричного характера распределения деформаций при росте трещины на рис. 13 (стр. 17);
- вопрос об определении коэффициента концентрации напряжений вблизи кругового отверстия;
- в работе не рассмотрены более опасные случаи ансамбля дефектов;
- в тексте автореферата не описано по каким формулам был осуществлен расчет локальных напряжений сдвига для слоисто-волоконистого композита стр. 14;
- в автореферате не ясно каким образом вывод в п. 2 можно распространить на композиционные материалы с другими армированиями;

- замечание об отсутствии интервалов достоверности данных на экспериментальных диаграммах рис. 5, 7, 8.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики материалов и конструкций, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет" (г. Самара) является одним из ведущих научных центров в области механики деформируемого твердого тела, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем прикладной математики и механики и механики композиционных материалов. Университет является учредителем научного издания "Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки", включенного в международную базу WoS. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры прикладной математики и информатики в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика экспериментального анализа полей перемещений и деформаций, использующая корреляцию цифровых изображений с учетом структурных особенностей материалов, позволившая выявить закономерности деформирования и разрушения слоисто-волоконистых композитов в зонах концентрации напряжений;

предложены гипотеза существования масштабного эффекта прочности слоисто-волоконистых композитов с концентраторами;

предложен на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур комплексный подход к исследованию влияния технологических дефектов на механическое поведение элементов конструкций из композитов;

введено критическое значение параметра структурной неоднородности, определяющее условие проявления масштабного эффекта прочности;

доказана перспективность использования бесконтактной оптической видеосистемы трехмерного анализа полей перемещений, а также алгоритмов обработки цифровых изображений для тестирования эффективности волоконно-оптических технологий мониторинга изделий из композиционных материалов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны преимущества использования бесконтактных средств идентификации деформационных полей и исследования на этой основе кинетики накопления поврежденности и условий разрушения композитов.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы экспериментальные методы исследования процессов деформирования и разрушения композитов с использованием современных испытательных и диагностических систем, в частности оптической системы трехмерного анализа перемещений и деформаций, аппаратуры термосканирования, а также алгоритмов обработки данных по методу корреляции цифровых изображений;

изложена совокупность новых экспериментальных данных, объясняющая особенности поведения композиционных материалов в области концентраторов;

раскрыты закономерности эволюции деформационных полей при развитии зон повреждений в области дефектов технологического и эксплуатационного происхождения;

изучено механическое поведение образцов углепластиков на основе различных конфигураций пространственных армирующих каркасов с оценкой чувствительности к наличию отверстий и дефектов структуры;

проведена модернизация алгоритмов обработки данных для определения деформационных и прочностных характеристик композитов при сдвиге.

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

разработаны методики для использования в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро и **внедрены** в практику предприятия ПАО «ОДК-Сатурн» для оценки свойств трехмерно-армированных полимерных композитов при проектировании деталей из них, а также в учебный процесс подготовки магистров кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»;

определены возможности практического использования полученных экспериментальных данных о механическом поведении и свойствах слоисто-волоконистых полимерных композиционных материалов;

представлены рекомендации по использованию видеосистемы трехмерного анализа полей перемещений и деформаций для калибровки, определения расположения, оценки чувствительности встроенных волоконно-оптических датчиков.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории и апробированных методик экспериментальных исследований;

идея экспериментальной методологии **базируется** на анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов неупругого деформирования и разрушения слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений;

установлено соответствие отдельных авторских результатов известным теоретическим и экспериментальным данным других авторов;

использованы современное экспериментальное оборудование и цифровые технологии обработки данных для исследования неоднородных полей деформаций композиционных материалов в области концентраторов напряжений.

Личный вклад соискателя состоит в проведении экспериментальных исследований в части использования трехмерной оптической видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций, а также аппаратуры термосканирования, получении данных и последующей математической обработке. Постановка задачи исследования, обсуждение результатов и подготовка публикаций в научных журналах проводилась совместно с научным руководителем.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи математического моделирования реометрических течений с учетом сдвигового расслоения потока, имеющее существенное значение для развития методов обработки экспериментальных данных жидкотекучих сред с изменяющейся в процессе течения структурой.

На заседании 19 декабря 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Струнгарь Е.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человека, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

 / Зуев А.Л.



20 декабря 2019 г.

М.П.