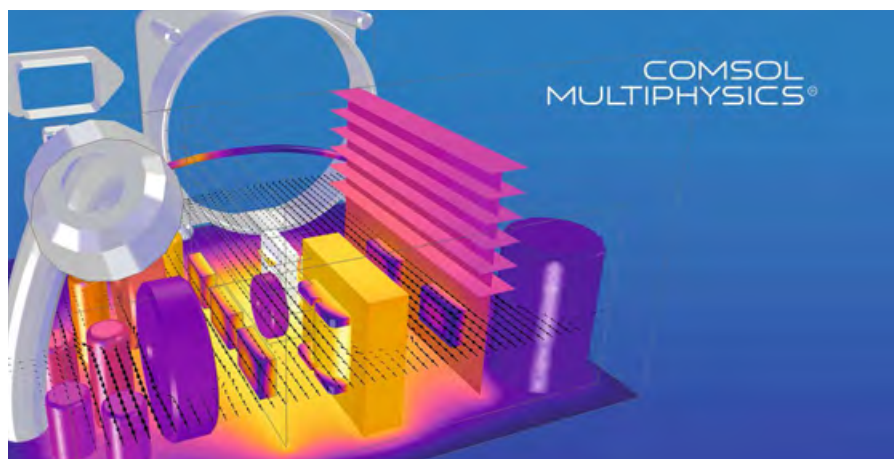




# Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик труб для ЖКХ из композитных материалов

## Введение

Композитные материалы, в частности, стеклопластики и углепластики, являются продуктами высоких технологий, состоящими из несущих волокон, встроенных в полимерные смолы. Так, композиты Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) — современные облегченные и прочные материалы. Этот вид композитов успешно применяется для производства различных изделий, используемых в повседневной жизни. Структура его армирована нитями из переплетенных волокон углерода, расположенных в матрице из полимерных, например, эпоксидных смол, выступающими в качестве главного компонента. Нити из таких волокон при меньшей плотности имеют высокое сопротивление на растяжение — значительно выше, чем у многих марок стали. Следовательно, материалы на их основе гораздо легче стали, что определяет их как альтернативный материал многих конструктивных решений современной индустрии.

Уже сегодня нельзя представить себе такие отрасли, как автомобилестроение, самолетостроение и многие другие без углепластика. Из него изготавливают кузовные детали, тормозные диски, диски сцепления автомобилей и даже целые крылья самолетов. Высокие механические характеристики углеволоконных материалов и положительный мировой опыт их применения создают объективные предпо-

сылки для широкого внедрения их и в инфраструктуру бытового и коммунального хозяйства. Однако высокая стоимость и техническая сложность производства всё ещё являются основными причинами «немассовости» этого материала.

Наряду с уникальными свойствами углепластика в целом следует отметить также и некоторые слабые его стороны. Это прежде всего сравнительно невысокая ударная прочность и возможность расщепления участков материала изделий при сложных эксплуатационных напряжениях, что считается отказом функционирования их в целом.

Для обеспечения надёжности изделий из углепластика необходима оценка показателей структурной целостности многослойных композитных ламинатов, образующих форму изделий и состоящих из ряда углеволоконных слоёв, в условиях возможных нагрузок при эксплуатации.

Несмотря на отмеченные объективные сложности производства и некоторые слабые стороны при эксплуатации, в настоящее время в технически развитых странах отмечен значительный рост использования композитных материалов из углеродных волокон. Созданы группы разработчиков новых технологий производства деталей и изделий из углепластика (автоклавное формование из полуфабрикатов, вакуумное формование в формах, метод намотки нитями и др.).

Рецензия эксперта на статью получена  
19.11.2019 [Expert review on the article  
received on November 19, 2019].

УДК 698.8. Научная специальность: 05.23.03.

## Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик труб для ЖКХ из композитных материалов

**В. А. Сучилин**, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Высокие эксплуатационные характеристики углепластиков и мировой опыт применения в изделиях создают предпосылки внедрения их в коммунальном хозяйстве. На основании изучения производства подобных изделий сделаны выводы, что успешное продвижение их в отрасли требует моделирования предпроектных исследований. Предложена методика моделирования в ПО COMSOL Multiphysics, позволяющая использовать базу мировых знаний в области композитных материалов.

**Ключевые слова:** углепластик, прочность, критерии отказа, моделирование изделий, функциональные характеристики.

UDC 698.8. The number of scientific speciality: 05.23.03.

## Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of pipes from composite materials for housing and communal services

**V. A. Suchilin**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RSUTS)

High operational characteristics of carbon fiber reinforced plastics and world experience in the use of products create the prerequisites for their implementation in communal services. Based on the study of the production of such products, it was concluded that their successful promotion in the industry requires modeling of pre-design studies. The modeling technique in COMSOL Multiphysics software is proposed, which allows using the world knowledge base in the field of composite materials.

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastics, strength, failure criteria, product modeling, functional characteristics.

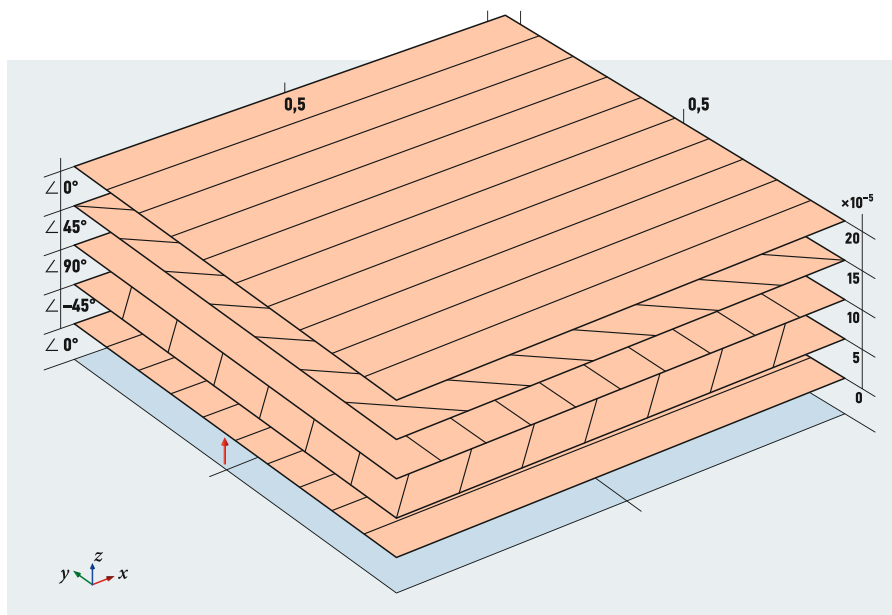


Рис. 1. Последовательность укладки слоёв ламината (снизу вверх) и ориентация волокон

Ведутся поиски удешевления производственного процесса, идут углублённые исследования свойств составляющих композитных материалов и повышения качества изделий на их основе [1–5].

Очевидно, что для более успешного внедрения углепластиковых материалов в отрасли необходимо широкое использование технологий компьютерного моделирования на всех этапах предпроектных исследований, что значительно ускорит научные и технологические разработки, поскольку численное моделирование позволяет не тратить время и ресурсы на проведение сложных экспериментальных исследований и создание сопутствующей оснастки.

Так, например, начиная с версии 5.4 в программном обеспечении COMSOL Multiphysics присутствует модуль Composite Materials и уже заложены возможности использования накопленных в мире научных и инженерных знаний в области исследования современных композитных материалов [6].

Представленный в статье материал является результатом анализа подобных исследований [6, 7] и собственных разработок методами моделирования и исследования свойств композитных материалов, включающих углеродные волокна (CFRP), погруженные в слой эпоксидной смолы (914С), и функциональных характеристик труб для ЖКХ на их основе в условиях действия механических нагрузок.

Исследуемые модели включают (по известной методике [7]) микромеханический анализ единичной ячейки композитного материала, состоящей из углеродного волокна, расположенного в слое смолы, что позволяет далее анализировать напряжения в изделиях с использованием

теории эквивалентного однослойного материала (ESL Theory) и проводить сравнительный анализ напряжений с использованием послойной теории (Layerwise Theory). Данное представленное исследование показывает, как можно моделировать многослойные композитные оболочки различных изделий и анализировать их работоспособность под нагрузками, используя модуль Composite Materials, интерфейс Layered Shell и узел Layered Linear Elastic Material [6].

В статье оценивается структурная надёжность ламината с разной ориентацией волокон в каждом слое через параметры индекс отказа (Failure Index) и коэффициент безопасности (Safety Factor), используя семь известных полиномиальных критериев отказа. Это анизотропный критерий Цая-Бу, ортотропные Цая-Бу, Цая-Хилла, Хоффмана, модифицированный Цая-Хилла, Аззи-Цая-Хилла и Норриса-Цая-Бу [6, 11, 12].

Из-за разной ориентации волокон каждый слой будет иметь различные характеристики прочности в продольном и поперечном направлениях, что важно ещё знать на этапе предпроектной подготовки любого изделия из углепластика. При использовании полиномиального критерия отказ любого слоя ламината считается отказом всего ламината. Численные решения COMSOL Multiphysics сравниваются со справочными данными.

Структурная геометрия задачи представляет квадратную пластину из пяти монослоёв ортотропного материала. Длина стороны составляет 1 см, и каждый слой имеет толщину 0,05 мм. Ламинат имеет послойную укладку  $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]$ , как показано на рис. 1, и подвергается осевой растягивающей нагрузке вдоль оси  $Ox$ . Свойства материала, критерии отказа, экспериментальные справочные данные напряжений в различных слоях взяты из библиотеки COMSOL.

На рис. 2 приводятся характеристики прочности ламината в продольном и поперечном направлениях под действием приложенной нагрузки. На рис. 2а показано напряжение по Мизесу в слоях ламината. Слои 1 и 5 более напряжены по сравнению с другими слоями (10–15 МПа), что обусловлено ориентацией волокон в этих слоях ( $0^\circ$  к оси  $Ox$ , то есть параллельно приложенной нагрузке). Средний слой 3 испытывает наименьшую нагрузку, максимальное напряжение в нём составляет всего лишь 3,5 МПа, что также обусловлено ориентацией волокон в слое ( $90^\circ$  к оси  $Ox$ , то есть поперёк направления нагрузки). Волокна слоя слабо противостоят растягивающей нагрузке. Слои 2 и 4 ламината ( $45^\circ$  и  $135^\circ$ ) имеют равные напряжения (до 7 МПа), что говорит о равных возможностях их сопротивляться растягивающей нагрузке.



Композит CFRP — современный облегчённый и прочный материал

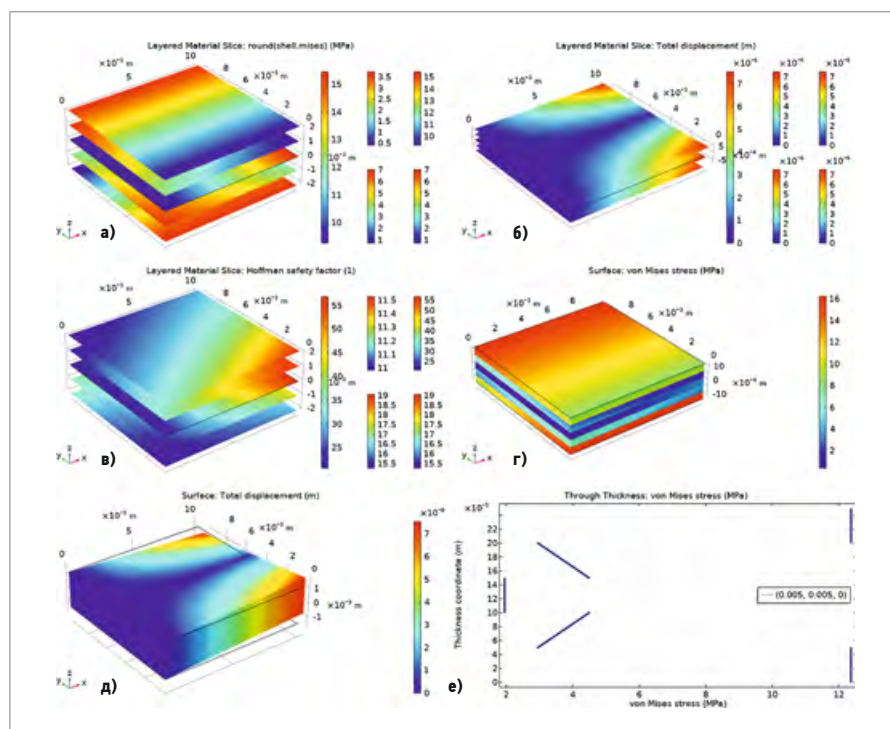


**Рис. 2.** Исследование характеристик жёсткости ламината в продольном и поперечном направлениях [а — напряжение по Мизесу в слоях ламината; б — деформация в слоях ламината; в — распределение коэффициента безопасности (SF) Хоффмана в слоях ламината; г — напряжение по Мизесу ламината в целом; д — деформация ламината в целом; е — распределение напряжения по Мизесу по толщине в середине пластины]

На рис. 2б отображена деформация слоёв ламината. Для наглядности она показана в увеличенном масштабе. Видно, что деформация слоёв под действием приложенной нагрузки неравномерна и не превосходит  $7 \times 10^{-6}$  м, что находится в пределах точности. При этом максимальное и минимальное значения по слоям одинаковы. Однако можно наблюдать локальные поворотные деформации на концах слоёв в зоне приложения нагрузки, особенно в слоях 2, 3 и 4. Это может привести к нежелательному краевому эффекту и расслоению, характерным для многослойных композитов оболочек [8]. Причиной полученного явления может служить влияние касательной составляющей напряжения в слоях 2 и 4 с расположением волокон, соответственно, в  $45^\circ$  и  $135^\circ$  в направлении приложенной нагрузки, при значительной разности в деформации слоёв, что приводит к их взаимному силовому влиянию в поперечном направлении.

На рис. 2в приведены распределения коэффициентов безопасности (SF) в слоях ламината по критерию Хоффмана для композитных материалов [11, 12]. Нижний 1 и верхний 5 слой (ориентации  $0^\circ$ , то есть вдоль оси Oх) имеют высокий коэффициент безопасности (25–55). В то же время средний слой 3 (11–11,5) отличается невысокой надёжностью из-за ориентации волокон, поскольку они распо-

ложены поперёк направления нагрузки. Волокна слоя слабо противостоят растягивающим усилиям. Слои 2 и 4 ламината имеют равные коэффициенты (15,5–19), что говорит о равных возможностях их сопротивляться растягивающей нагрузке. Результаты хорошо согласуются с показателями рис. 2а.

**После моделирования структуры трубы исследуются условия монтажных операций по переносу и укладке трубы. Известно, что трубы из волокнистого материала требуют аккуратного обращения при выполнении монтажных работ, и при нарушении технологии на этом этапе возможны ударные воздействия или высокие напряжения на отдельных участках трубы, что может привести к образованию микротрещин в ламинате материала и к дефекту, например, расслоению**

На рис. 2г представлено напряжение по Мизесу во всём объёме ламината. Видно, что пограничные зоны между слоем 2 и 3 и слоем 3 и 4 испытывают напряжения в пределах 6–8 МПа из-за собствен-

ной изгибающей деформации в них, что также было видно на рис. 2б. Напряжения неравномерные, что является следствием влияния ориентации слоёв.

На рис. 2д показан вид деформации пластины ламината в целом, подтверждающий, что ламинат получает сложную деформацию от действующей растягивающей нагрузки. Причиной этого являются, как отмечено, особенности структуры ламината и вызванное ими силовое взаимовлияние слоёв. На рис. 2е приводится распределение напряжения по Мизесу по толщине ламината в середине пластины. Показано, что распределение напряжения по всей толщине ламината неравномерно. Оно может быть как постоянным в отдельных слоях, так и подвержено изменению по слоям. Максимальное напряжение наблюдается в слоях 1 и 5 и составляет около 12,7 МПа. На границах между слоями 1–2 и 4–5 лишь 3 МПа, что вызывает скачок напряжённого состояния в материале матрицы слоёв ламината. Это также опасно для обеспечения надёжности ламината в целом.

Такое резкое изменение напряжения в слоях и между слоями ламината может привести как к расслоению ламината, так и к растрескиванию материала матрицы. Между слоями 2–3 и 3–4 напряжения меняются примерно с 2,0 до 4,5 МПа, что не так значительно. Очевидно, что для устранения скачков напряжения в слоях ламината конкретных изделий необходимо проектировать большее число слоёв ламината и чередование ориентации слоёв с меньшим углом поворота.

Для исследования функциональных характеристик изделий из углепластика принята цилиндрическая газовая труба: длина 8 м, диаметр 0,2 м, толщина стенки 25 мм. Ламинат состоит из пяти слоёв ортотропного материала толщиной по 5 мм. Ориентация слоёв снизу вверх  $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]$  по отношению к внутренней системе координат ламината.

Моделирование структуры трубы из многослойного материала проводится в интерфейсе Layered Shell по методике, рассмотренной выше, затем исследуются условия монтажных операций по переносу и укладке трубы в траншею.

Априори известно, что трубы из волокнистого материала требуют аккуратного обращения при выполнении монтажных работ [9, 10], и при нарушении технологии на этом этапе возможны ударные воздействия или высокие напряжения на отдельных участках трубы, что может привести к образованию микротрещин в ламинате материала и к его дефекту, например, в виде расслоения.

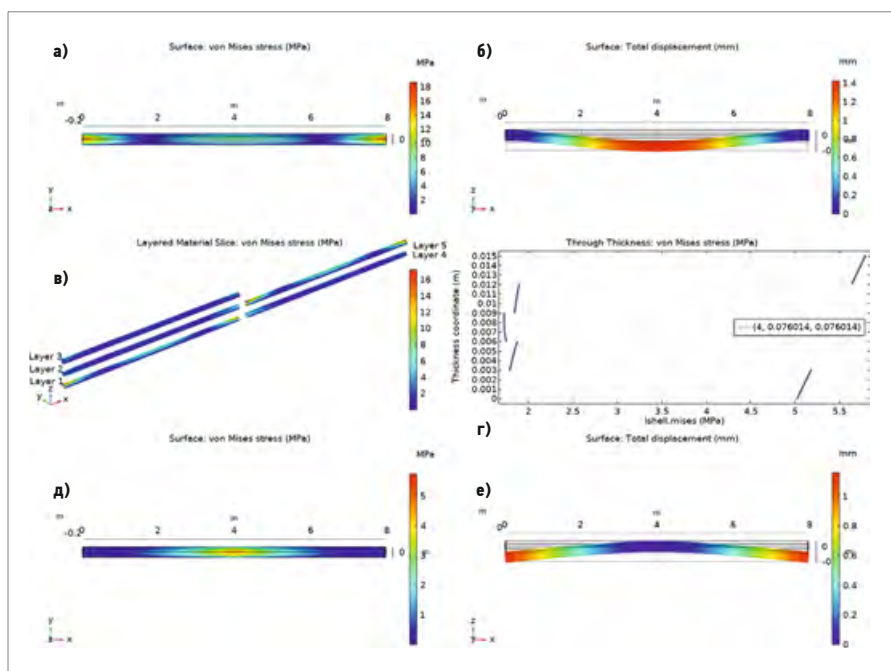


**Рис. 3.** Функциональные характеристики углепластиковой трубы [а — распределение напряжения по Мизесу по длине трубы (модель 1); б — прогиб трубы в целом (модель 1); в — распределение напряжения по Мизесу по слоям ламината (модель 1); г — распределение напряжения по Мизесу по толщине в середине трубы (модель 1); д — распределение напряжения по Мизесу по длине трубы (модель 2); е — прогиб трубы в целом (модель 2)]

Рассматривается два способа удержания трубы. В первом случае труба удерживается захватами-крюками трубоукладчика за оба её конца. С целью снижения напряжения на концах трубы крюки модернизированы — оборудованы специальными насадками цилиндрической формы из пластика (модель 1 исследования).

Во втором случае труба удерживается в срединной части гибкой лентой (модель 2 исследования).

На рис. 3 показаны функциональные характеристики углепластиковой трубы (модель 1 и модель 2). На рис. 3а (модель 1) показано распределение напряжения по Мизесу по длине трубы от действия модернизированных крюков трубоукладчика. Видно, что максимальное напряжение (18 МПа), приводящее к локальной упру-

гой деформации слоёв ламината на концах трубы, достигается в зонах контакта трубы с крюками трубоукладчика (красные участки графика).

В срединной части трубы напряжения (4–8 МПа) возникают под действием собственного веса трубы. При этом труба получает некоторый прогиб вниз. Предварительно было установлено, что крюки трубоукладчика без модернизации создают напряжения на концах её в три-пять раз выше. Дальнейшее снижение напряжения на концах трубы при транспортировке, видимо, возможно путём увеличения размеров насадок на крюках.

На рис. 3б прогиб трубы для наглядности показан в увеличенном масштабе, при этом максимальное значение прогиба равно лишь 1,4 мм. На рис. 3в пока-

но распределение напряжения по Мизесу по слоям ламината. Видно, что на концах трубы в слоях 1 и 5 напряжение равно 18 МПа, в слоях 2 и 4 в пределах 6–8 МПа, средний же слой практически не нагружен. В области прогиба трубы напряжены слои 1 и 5, напряжение не превышает 6 МПа. Слои 2, 3 и 4 практически не нагружены. Проведённое исследование показывает, что волокна углепластика, расположенные вдоль оси трубы, эффективно работают на растяжение и изгиб.

На рис. 3г приводится распределение напряжения по Мизесу по толщине ламината в середине трубы. Показано, что распределение напряжения по всей толщине ламината неравномерно. Оно может быть как постоянным в отдельных слоях, так и подвержено изменению по слоям. Максимальное напряжение наблюдается в слоях 1 и 5, где напряжение, соответственно, меняется примерно от 5,0 до 5,2 МПа и от 5,9 до 5,7 МПа. При переходе к слоям 2 и 4, соответственно, меняется до 1,6 и 1,8 МПа. В слоях 2, 3 и 4 напряжение не превышает 1,8 МПа.

Для выравнивания напряжений в оболочке трубы необходимо проектировать большее число слоёв ламината и чередовать ориентации слоёв с меньшим углом поворота и с учётом эффективности восприятия ими действующих в изделиях нагрузок.

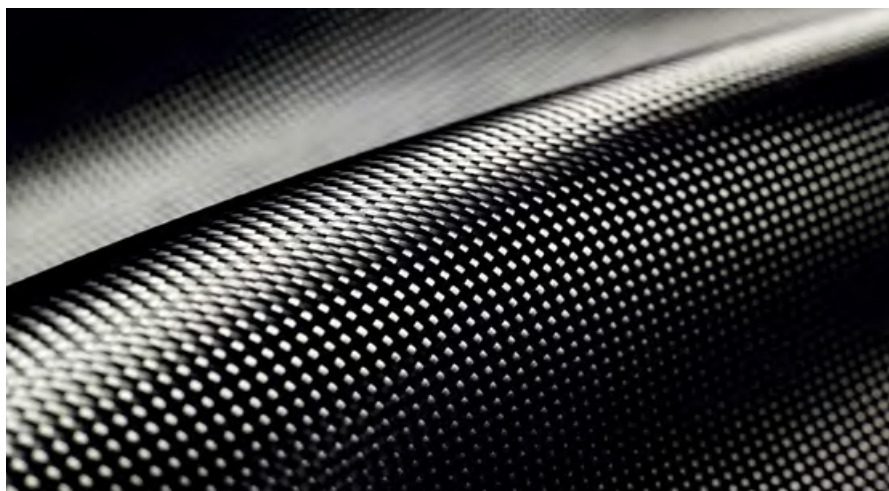
На рис. 3д (модель 2) показано распределение напряжения по Мизесу при подъёме трубы за подвеску в виде гибкой ленты, например, нейлоновой стропой [10] в срединной её части. Видно, что напряжение максимально в срединной части (5 МПа). Это напряжение испытывает пятый слой, первый слой — в пределах 3,5 МПа. Другие слои мало нагружены. На концах труба получает некоторый прогиб от действия собственной массы.

На рис. 3е показан прогиб концов трубы от собственного веса. Он не превосходит 1 мм.

Более целесообразным способом переноса подобных труб можно считать удержание трубы гибкими лентами в срединной части трубы. Как показало дополнительное моделирование, напряжение в срединной части трубы снижается вдвое при удержании трубы двумя разведёнными лентами в срединной части.

Для трубопровода из углепластиковых труб важно также знать состояние его в целом при локальных подвижках грунта, а также оползней на склонах холмов в осенние и весенние времена года, когда возможно обводнение и размягчение грунта. Подобные задачи также удобно моделировать в COMSOL Multiphysics.





## Заключение

1. Высокие механические и эксплуатационные характеристики углеволоконных материалов и положительный мировой опыт создания технологий производства и применения их в изделиях создают объективные предпосылки для широкого внедрения углепластика в инфраструктуру бытового и коммунального хозяйства.

2. Успешное продвижение углепластиков в различные отрасли потребует многие предпроектные исследования и разработки решать путём компьютерного моделирования. Так, например, моделирование в ПО COMSOL Multiphysics позволяет использовать базу данных накопленных мировых научных и инженерных знаний в области исследования современных композитных материалов.

3. В статье при моделировании ламината углепластика оценивалась его структурная надёжность с различной ориентацией волокон в слоях через параметры Failure Index и Safety Factor, используя семь известных полиномиальных критериев отклика. При этом ориентация слоёв предопределяет характеристики их прочности под действием приложенной нагрузки в изделиях из волокнистых материалов.

4. Полученные результаты численного моделирования углепластикового ламината с заданной нагрузкой растяжения в COMSOL Multiphysics показывают, что напряжение по Мизесу в пяти слоях ламината распределено неравномерно. Слои с ориентацией волокон вдоль приложенной нагрузки, в данном случае по оси  $Ox$ , более напряжены по сравнению с другими слоями, что определяет эффективность их работы при нагрузке растяжения ламината. Слой с ориентацией волокон поперёк оси  $Ox$  принимает наименьшую нагрузку, то есть волокна слабо противостоят растягивающей нагрузке. Слои с поворотом волокон на  $45^\circ$  и  $135^\circ$  к оси  $Ox$  напряжены умеренно, поскольку у них есть ненулевая составляющая напряжений вдоль приложенной нагрузки. Очевидно, что для обеспечения более

равномерного напряжения в слоях ламината изделий, следовательно, и для повышения их надёжности, необходимо проектировать большее число слоёв ламината и чередовать ориентации слоёв с меньшим углом поворота и с учётом эффективности восприятия ими действующих в изделиях нагрузок.

5. Коэффициенты безопасности слоёв ламината в данном исследовании по критерию Хоффмана ( $SF$ ) для композитных материалов показывают, что слои с ориентацией волокон вдоль приложенной нагрузки имеют высокий коэффициент безопасности ( $SF_{\max} = 55$ ). В то же время слой с ориентацией волокон поперёк приложенной нагрузки отличается низкой надёжностью ( $SF_{\max} = 11,5$ ) и, следовательно, возможен его отказ при эксплуатации. Слои с поворотом волокон на  $45^\circ$  и  $135^\circ$  к действующей нагрузке имеют среднее значение надёжности ( $SF_{\max} = 19$ ).

## Высокие механические и эксплуатационные характеристики углеволоконных материалов создают объективные предпосылки для широкого внедрения углепластика в инфраструктуру

6. При моделировании изделий из углепластика, в частности, труб для коммунального хозяйства, достаточно успешно можно использовать методику исследования в интерфейсе Layered Shell ПО COMSOL Multiphysics, включающую библиотеку свойств материалов, критерии отказа, экспериментальные справочные данные напряжений в различных слоях и другие исходные данные.

7. Анализ практики применения труб из волокнистых материалов показал, что они требуют аккуратного обращения при выполнении монтажных работ, так как нежелательны ударные воздействия или высокие напряжения на отдельных участках трубы могут привести к образо-

ванию микротрещин в матрице ламината и к его дефекту, например, в виде расслоения ламината.

8. Проведено моделирование и исследование структуры углепластикового ламината для газовой трубы, её конструкции и функциональных характеристик в условиях выполнения монтажных операций по переносу и укладке трубы в траншею. Показано, что перенос труб из волокнистых материалов с помощью крюков трубоукладчика за оба её конца недопустим. Допустимыми монтажными операциями с подобными трубами можно считать перенос их с помощью подвески в средней части одной или двумя гибкими нейлоновыми лентами, что практически не нагружает слои трубы.

9. Условиями повышения надёжности и эффективности изделий из углепластика в период жизненного цикла можно считать: наличие полной информации о механических нагрузках их в условиях эксплуатации при предварительной проработке структуры ламинатов, составляющих оболочки изделий, в соответствии с этими нагрузками; определение действующих в слоях волокнистого материала напряжений и деформаций; выполнение оценки надёжности слоёв ламината на расслоение и растрескивание матрицы по соответствующим критериям. ●

1. Работнов Ю.Н., Когаев В.П., Полилов А.Н., Стрекалов В.Б. Критерий межслойной прочности углепластиков при циклических нагрузках // Механика композитных материалов, 1982. №6. С. 983–986.
2. Литвинов В.Б., Кобец Л.П., Токсанбаев М.С., Деев И.С., Бучнев Л.М. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон // Композиты и наноструктуры, 2011. №3. С. 36–50.
3. Гриценко С.В. Расчёт и проектирование изделий из слоистых композитов с учётом межслойных эффектов // Труды МАИ, 2015. №84. С. 1–19.
4. Муиземнек А.Ю., Карташова Е.Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов: Учеб. пособие. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. 56 с.
5. Нелюб В.А. Высокопрочные углепластики на основе эпоксидной матрицы с регулируемым адгезионным взаимодействием. Дис. канд. техн. наук по спец. 05.17.06. — М.: ПХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 157 с.
6. Soami P. Introducing the composite materials module. Web-source: comsol.com. Access data: November 11, 2019.
7. COMSOL Multiphysics User's Guide: Micromechanics and stress analysis of a composite cylinder. Web-source: comsol.com. Access data: November 11, 2019.
8. Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Влияние структуры пакета на краевые эффекты в слоистых композитах // Исследования наукограда, 2014. №3. С. 25–30.
9. ГОСТ Р 53201–2008. Трубы стеклопластиковые и фибринги. ТУ. — М.: Стандартинформ, 2010. 38 с.
10. Монтаж труб из стеклопластика [Электр. ресурс]. ООО «Пласт Профиль». Режим доступа: plastprofil.ru. Дата общ.: 11.11.2019.
11. Гриневич А.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ, 2019. №7. С. 92–111.
12. Hopkins P. Benchmarks for membrane and bending analysis of laminated shells. Part 2: Strength analysis. NAFEMS Ltd. 2005.

References — see page 93.

**Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of pipes from composite materials for housing and communal services. Pp. 37–41.**

**Vladimir A. Suchilin**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RSUTS)

1. Rabotnov Ju.N., Kogaev V.P., Polilov A.N., Strekalov V.B. *Kriterij mezhslojnoj prochnosti ugleplastikov pri ciklicheskih nagruzkah* [The criterion for the interlayer strength of carbon fiber under cyclic loads]. *Mehanika kompozitnyh materialov* ["The mechanics of composite materials" Magazine]. 1982. No. 6. Pp. 983–986. [In Russian]
2. Litvinov V.B., Kobec L.P., Toksanbaev M.S., Deev I.S., Buchnev L.M. *Strukturno-mechanicheskie svojstva vysokoprochnykh ugleodnykh volokon* [Structural and mechanical properties of high-strength carbon fibers]. *Kompozity i nanostrukturny* ["Composites and nanostructures" Magazine]. 2011. No. 3. Pp. 36–50. [In Russian]
3. Grishhenko S.V. *Raschjot i proektirovanie izdelij konstrukcii samoljota iz sloistykh kompozitov s uchjotom mezhsloevykh jeffektov* [Calculation and design of aircraft structural products from layered composites taking into account interlayer effects]. *Trudy MAI* [Proc. of the Moscow Aviation Institute]. 2015. No. 84. Pp. 1–19. [In Russian]
4. Muzemnek A.Ju., Kartashova E.D. *Mehanika deformirovaniya i razrusheniya polimernykh sloistykh kompozicionnykh materialov: Ucheb. posobie* [The mechanics of deformation and fracture of polymer layered composite materials: A textbook]. Penza. *Izd-vo PGU* [Publishing House of Penza State University]. 2017. 56 p. [In Russian]
5. Neljub V.A. *Vysokoprochnye ugleplastiki na osnove jepoksidnoj matricy s regulirovannym adgezionnym vzaimodejstviem* [High-strength carbon plastics based on an epoxy matrix with regulated adhesive interaction]. *The PhD dissertation in the specialty No. 05.17.06. Moscow. RHTU im. D.I. Mendeleeva* [Mendeleev Russian University of Chemical Technology]. 2015. 157 p. [In Russian]
6. Soami P. Introducing the composite materials module. Web-source: comsol.com. Access data: November 11, 2019.
7. COMSOL Multiphysics User's Guide: Micromechanics and stress analysis of a composite cylinder. Web-source: comsol.com. Access data: November 11, 2019.
8. Dudarkov Ju.I., Levchenko E.A., Limonin M.V. *Vliyanie struktury paketa na kraevye jeffekty v sloistykh kompozitah* [The effect of the package structure on edge effects in layered composites. Research science city]. *Issledovaniya naukoigrada* ["Science city research" Magazine]. 2014. No. 3. Pp. 25–30. [In Russian]
9. GOST R [State Industry Standard of Russia No.] 53201-2008. *Truby stekloplastikovye i fitingi. Tehnicheskie uslovija* [Fiberglass pipes and fittings. Technical conditions]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2010. 38 p. [In Russian]
10. *Montazh trub iz stekloplastika* [Installation of fiberglass pipes]. *OOO "Plast Profil"* ["Plast Profile", LLC]. Web-source: plastprofil.ru. Access data: November 11, 2019. [In Russian]
11. Grinevich A.V., Jakovlev N.O., Slavin A.V. *Kriterii razrusheniya polimernykh kompozicionnykh materialov (obzor)* [Criteria for destruction of polymer composite materials (review)]. *Trudy VIAM* [Proc. of the All-Russian Institute of Aviation Materials]. 2019. No. 7. Pp. 92–111. [In Russian]
12. Hopkins P. Benchmarks for membrane and bending analysis of laminated shells. Part 2: Strength analysis. NAFEMS Ltd. 2005.