

По материалам:
www.composites-cis.com
www.korabel.ru
www.tsagi.ru

Композиты СНГ – по пути к цифровой экономике

В этом году VIII международная конференция «Композиты СНГ-2018» — ежегодная эффективная площадка для встреч представителей делового и научного сообществ, участвующих в производстве и применении композиционных материалов и решений на их основе в странах Содружества Независимых Государств (СНГ), состоялась 11–12 октября в гостинице «Рэдиссон Роза Хутор» в Красной Поляне в горах над Сочи.

Работа велась по направлениям: «Композиционные материалы и цифровизация экономики» и «Стоимостной анализ жизненного цикла изделий из полимерных композиционных материалов». Также работали специальные секции «Композиты в авиации» и «Технологии применения композиционных материалов в медицине».

По уверениям организаторов, проведение такого рода конференций в местах, удаленных от столичной суеты, позволяет участникам сосредоточиться на содержании докладов и принять живое обсуждение в прениях. Забегая вперед, необходимо отметить, что данный тезис получил реальное подтверждение в процессе проведения конференции. Порядка 90% делегатов конференции не покинули заседаний до самого конца второго дня, принимая самое непосредственное участие в обсуждении сделанных спикерами докладов.



Докладчики представляли различные отрасли и различные позиции на рынке (производители изделий, специалисты в области программного обеспечения для проектирования, разработчики технологий и материалов, поставщики сырьевых компонентов), общим для всех докладов был их высокий уровень. Важно отметить, что некоторые данные, представленные на конференции, были озвучены и опубликованы впервые.

Два доклада, открывавшие конференцию, задали высокий тон дискуссии: обнаружилась заметная разница в подходах крупной компании-покупателя (С. В. Ильин, Автодор) и компании, представляющей малый бизнес по изготовлению изделий из полимерных композиционных материалов (А. Е. Ушаков, АпАТэк) к использованию цифровых методов для оценки соответствия изделий предъявляемым требованиям. Динамичное обсуждение, завязавшееся после выступлений докладчиков, было продолжено в кулуарах и безусловно способствовало нахождению взаимопонимания при объективном различии интересов.

Несмотря на то, что среди представленных докладов доля авиационных применений композитов была весьма значительной (С. А. Титов, ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского; С. Ю. Хаширова, Центр прогрессивных материалов и аддитивных технологий Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова; Шубин А. Н., Инновационные технологии и решения; Шибяев А. О., ПЛМ Урал), обсуждения носили межотраслевой характер: так, компетенции, развитые в отечественном композитном судостроении, неоднократно сопоставлялись (М. Э. Францев, Ахто-Пласт-Эксперт) с достижениями в области материалов и технологий, развитыми для других отраслей, в частности, с технологиями ремонта высокоответственных изделий из полимерных композиционных материалов.

В докладах Т. В. Сафронова (МГУ им. М. В. Ломоносова) и С. Ю. Хаширова (Центр прогрессивных материалов и аддитивных технологий Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова) были затронуты вопросы, касающиеся применения композиционных материалов в медицине.

Было широко освещено опыт разработки в среде ANSYS конечно-элементной прочностной модели надстройки пассажирского судна на подводных крыльях, выполненной под руководством автора в МИЦ «Композиты России» при МГТУ им. Н. Э. Баумана. Были рассмотрены другие примеры проектирования конструкций из композитов с использованием среды ANSYS, в том числе, на основе ячеистой структуры. Были сформулированы и проиллюстрированы принципы верификации численных моделей с использованием инструментальных исследований методами неразрушающего контроля. В заключение доклада были озвучены выводы, полученные разработчиками скоростного катамарана из композита на основе углеродного волокна с использованием программных комплексов ANSYS, NASTRAN и PAM-RTM.

С описанным выше докладом очень близко перекликался доклад, сделанный представителем



компании «PLM Урал» А.О. Шibaевым, который был посвящен использованию численных методов при проектировании изделий из композиционных материалов. В частности, в докладе рассматривался программный пакет ESI PAM-RTM, который предназначен для моделирования технологического процесса изготовления композитного изделия методом пропитки сухой ткани связующим.

В этом программном продукте реализована возможность расчета всех основных технологий производства методом инъекции связующего в форму. В ходе расчета пользователь отрабатывает оптимальную схему производства изделия, варьируя при необходимости, схему подачи/отвода связующего, расположение вакуумных портов, укладку композита, материалы, связующее, температурные режимы и так далее. Прогнозируется фронт распределения связующего, наличие сухих зон, пористость изделия, поле давления, степень полимеризации и ряд других параметров. Расчет процессов пропитки композитов позволяет определить оптимальную технологию производства, спрогнозировать места образования и причины появления дефектов. Аудитория проявила к докладу большой интерес.



В докладе также сообщалось, что программа PAM-RTM использовалась при постройке на Средне-Невском судостроительном заводе скоростного пассажирского катамарана из композита на основе углеродного волокна.

Много внимания в докладах было уделено такому перспективному материалу, как композит на основе базальтового волокна или базальтопластик. Доклад ученого секретаря НПО «Стеклопластик» Деминой Н.М. был посвящен сравнительному анализу армирующих высокопрочных стеклянных и базальтовых волокон и их перспективному применению в различных областях техники, в том числе, в судостроении. В докладе представителя научно-производственной компании «РБ-Композит» Шестопалова В. Ю. рассматривались особенности создания и использования сотового наполнителя на основе стекло-, базальто- и углепластиков, в том числе, как материала среднего слоя изделий из композитов для судостроения.



В докладе, в частности, указывалось, что данные материалы рассматриваются Средне-Невским судостроительным заводом как основа для изготовления крышек люков различных типов. По сообщению ряда других докладчиков, пространственно-армированные конструкции из композитов на основе различных типов армирующих волокон в настоящее время рассматриваются в качестве очень перспективных материалов для судостроения, в частности, эти материалы также привлекают внимание Средне-Невского судостроительного завода, как основа для изготовления дельтовых вещей.



Большой интерес вызвал доклад представителя компании ИТЕКМА И. А. Тимошкина, в котором рассказывалось о результатах создания огнестойкого композита, выдерживающего испытания открытым огнем при высоких температурах. Известно, что пожарная опасность является одним из сдерживающих факторов применения композитов в отечественном

гражданском судостроении. Поэтому применение такого рода материалов для огнестойких и огнезадерживающих конструкций может позволить решить эту проблему при условии сертификации этих материалов по правилам отечественных классификационных обществ.

Вопросы, касающиеся жизненного цикла композитных изделий, от подбора сырьевых материалов для их изготовления до имеющихся возможностей утилизации, были подробно освещены в докладах Г.В. Ильиных (Пермский национальный исследовательский политехнический университет), Д. М. Белобородова (Olin), М. Щербы (Saertex).

Начальник сектора Научно-технического центра Научно-производственного комплекса ФГУП «ЦАГИ» Сергей Титов рассказал о способах повышения прочности и ресурса металло-композитных соединений, а также особенностях ремонта поврежденных авиационных деталей из ПКМ.

В своем выступлении он представил наработки Научно-технического центра НПК института в сфере изучения особенностей внедрения композитов в конструкциях летательных аппаратов. Расширение области применения таких материалов в авиации поставило вопрос о возможности их ремонта, а также разработке соответствующих методик и технологического оснащения. Сотрудниками НТЦ были проанализированы основные варианты восстановительных работ: с приклеенными соединительными элементами и с клее-механическим присоединением ремонтных элементов (с механическим металлическим крепежом). А также предложен способ ремонта повреждений в деталях из ПКМ, основанный на применении специализированных металлических закладных элементов и эффективной клеевой композиции. Исследование данного метода на конструктивно-подобных образцах дало положительные результаты.

В работе «Способ повышения прочности и ресурса металло-композитных соединений в авиационных конструкциях на основе применения наноклеевой композиции» были рассмотрены наиболее существенные вопросы обеспечения прочности болтовых соединений в конструкциях данного типа. В их числе технология изготовления отверстий в ПКМ, ее влияние на прочность и долговечность узлов соединений.

В дополнение к первоначально заявленной программе конференции, были сделаны еще 2 доклада: И.И. Крыжановский (наблюдательный совет Центра международных и сравнительно правовых исследований, экспертный совет Союза КТИ) рассказал о перспективах разработки системы нормативного регулирования применительно к внедрению цифровой сертификации в рамках реализации национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации»; А. П. Белоглазов (Ниагара) представил последние разработки в области альтернативного подхода к структурному усилению различных изделий, в том числе бетонных, стеклопластиковыми объемными высокопрочными каркасами, собираемыми из листовых элементов, легко поддающихся транспортировке.



По мнению участников, конференция КОМПОЗИТЫ СНГ — уникальная площадка для общения специалистов из различных отраслей композитной индустрии, позволяющая актуализировать новые разработки — для чего исключительно полезен не только «свежий взгляд» со стороны специалистов из смежных областей, но и требуется подчас переосмысление решений и результатов, известных из прошлого «классического» опыта. **КМ**

Присоединяйтесь к форуму ведущих профессионалов композитной индустрии! Будем рады видеть вас и коллег среди участников IX конференции КОМПОЗИТЫ СНГ 2019 в Баку!

М. Э. Францев, к.т.н.
компания АХТО-ПЛАСТ-ЭКСПЕРТ

Способы верификации проектных решений,

полученных численными методами, при создании судов и их крупных элементов из композиционных материалов с позиций обеспечения их характеристик долговечности

1. Францев М. Э. Принципы проектирования корпуса скоростного судна из композитов по условиям его весовой эффективности и обеспечения жизненного цикла // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2016. – № 41. – С. 196-208.
2. Францев М. Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок // Труды Государственного Крыловского Научного Центра, Санкт-Петербург. – 2013. – № 75 (359). – С. 192-200.
3. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-ти томах). – М., 2015.
4. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов часть XVI «Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика». – СПб. 2018.
5. Бураковский Е. П., Дмитровский В. А. Применение теории потоков при оценке и прогнозировании технического состояния корпусных конструкций, содержащих эксплуатационные дефекты // Сборник научных трудов Калининградского государственного технического университета, посвященный 300-летию Российского флота, Калининград. – 1996. – С. 263-278.
6. Францев М. Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов // Морской вестник. – 2008. – № 4 (28). – С. 93-98.
7. Францев М. Э. Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 1. – С. 67-73.
8. Баженов С. Л. и другие. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. – 354 с.
9. Францев М. Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 3. – С. 86-97.
10. Францев М. Э., Зайцев О. В., Золотаренко И. Д. Модель проектного обеспечения прочности надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с использованием численных методов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2016. – № 3. – С. 160-168.
11. Клебанов Я. М., Давыдов А. Н., Биткина Е. В. Методика расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов // ANSYS Advantage. Русская редакция. Инженерно-технический журнал. – 2008. – № 8. – С. 11-14.
12. Францев М. Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 11. – С. 61-68.
13. Францев М. Э. Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля // В мире НК. – 2016. – № 4. – С. 13-17.
14. ОСТ 5.9102-87 «Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля». – Л.: ЦНИИТС, 1987. – 36 с.
15. Васильев Р. В. Применение современных средств компьютерного моделирования при проектировании и постройке скоростного пассажирского катамарана из углепластика // Инновации. – 2015. – № 3 (197). – С. 108-112.

Введение

В октябре 2018 года в Красной Поляне (Сочи), прошла VIII Международная конференция Композиты СНГ 2018. В качестве основной темы конференции рассматривалась роль численных методов в процессе создания композитных материалов и стоимостной анализ жизненного цикла изделий из них. Автором, который был одним из спикеров конференции, был сделан доклад. Основные положения этого доклада содержатся в данной статье.

Проектирование корпуса судна или крупного элемента судовой корпусной конструкции из композитов представляет собой триединую задачу: проектирование собственно конструкции корпуса или элемента, технологии изготовления корпуса или элемента, композитного материала для конструкции на базе определенных исходных материалов и технологий.

Проектирование судовых корпусных конструкций из композитов только на основе учета действующих на них эксплуатационных нагрузок позволяет существенно снизить их массу. Например, теоретически конструкция из композитов на основе углеродного волокна на 45–50% легче по отношению к аналогу из легких сплавов. При этом одновременно происходит снижение расходов в течение жизненного цикла конструкции почти на 25%, что может повлечь за собой существенное снижение срока окупаемости затрат на строительство судна. Пока углеродное волокно дорого, но по сообщениям в специализированных периодических изданиях к 2020 году прогнозируется снижение цен на него до 10 \$ за кг. Это сделает конструкции из композитов на основе углеродного волокна вполне конкурентоспособными для судостроения.

Высокие эксплуатационные характеристики судов из композитов могут обеспечить эффективные оптимальные судовые корпусные конструкции, имеющие минимальное ухудшение прочностных свойств в процессе эксплуатации. Для проектирования и изготовления эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из композитов предпочтительны технологии формообразования, способные изменять параметры оптимизации конструкций в широких пределах, например, вакуумная инфузия или различные виды RTM-процессов. При этом функциональные возможности технологий проектирования и осуществления процессов формообразования должны быть согласованы для работы в установленных диапазонах изменения параметров оптимизации. При разработке таких согласованных технологий возникает новый класс задач, которые требуют согласованных решений на техническом уровне и на уровне исследований. Принципы проектирования эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из композитов по условиям их весовой эффективности и обеспечения жизненного цикла изложены в работе [1].

Современный этап развития судостроения из композитов характеризуется все более широким использованием современных интегрированных систем CAD/

CAE, что позволяет ускорить процессы проектирования и исследования различных конструкций, в том числе судовых корпусных конструкций из композитов. Считается, что использование современных методов вычислений, реализованных в комплексах CAD, дает возможность создавать геометрические модели изделий, а также менять конструкцию без проведения экспериментов, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям. Декларируется, что комплексы CAE позволяют проводить имитационное моделирование работы исследуемых изделий с описанием их геометрии, физики моделируемых процессов, свойств используемых материалов, эксплуатационных и других характеристик.

Доклад посвящен рассмотрению способов верификации проектных решений, полученных численными методами в области создания судов из композитов и их крупных элементов.

Постановка задачи

Известно, что оптимальные анизотропные конструкции, несут нагрузки различной физической природы, которые вызывают существенные механические напряжения в материале. Эти конструкции нужно армировать в соответствии с совокупностью (схемой) направлений (траекторий) распространения напряжений (деформаций) внутри объема конструкции. При этом армирующие материалы должны располагаться в объеме судовой корпусной конструкции из композита установленным при оптимизации образом. Это эквивалентно построению модели процесса формообразования, использующей найденные значения параметров оптимизации, найденные эквивалентные реализуемые траектории и очередность укладки армирующих материалов на изменяющуюся поверхность выкладки, а также ограничению исполнительной системы формообразования (имеющейся или подлежащей созданию). В результате этого можно получить виртуальную пространственную модель армированной анизотропной конструкции, которую можно подвергнуть анализу. Несколько итераций подобного анализа и синтеза приведёт к технологически реализуемой оптимальной конструкции из композитов.

Связной задачей является задача обеспечения качества композита при ограниченной производительности исполнительной системы формообразования и ограниченном времени жизни связующего материала, которая сводится к задаче синтеза соответствующих схем армирования и одновременной пропитки их связующим. В настоящее время существуют возможности разработки конкурентоспособных технологий и обеспечивающей их инфраструктуры, позволяющих гарантировать высокие эксплуатационные качества судов за счет создания эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из композитов.

При анализе проектировочных уравнений можно увидеть, что для судовых корпусных конструкций из композитов, при их фиксированных геометрических размерах, условие весовой эффективности может

быть представлено условием минимизации толщины их обшивки:

$$t_{cp} \rightarrow \min \quad (1)$$

где t_{cp} — средняя толщина обшивки [1].

Известно, что использование различных технологий изготовления судовых корпусных композитных конструкций сопровождается появлением технологических дефектов типа расслоение и непроклей, которые влекут за собой снижение характеристик прочности конструкции. В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа расслоение технологической природы и возникновение дефектов типа расслоение эксплуатационной природы. Это обстоятельство требует от проектанта выполнения специального расчета при оценке прочности судового корпуса из композитов, направленного на учет влияния внутреннего дефекта технологической и эксплуатационной природы на прочность элемента конструкции (рисунок 1).

В процессе эксплуатации на корпус судна из ком-

позитов действуют различные эксплуатационные нагрузки. Природа, характер и продолжительность воздействия этих нагрузок на корпус судна из композитов целиком и полностью идентичны аналогичным характеристикам эксплуатационных нагрузок, действующим на корпуса судов, изготовленных из традиционных материалов. Но композитные материалы реагируют на эти нагрузки принципиально иным образом.

Известно, что понятие прочности и долговечности судовых корпусных конструкций из композитных материалов относится к стойкости композита к воздействиям эксплуатационных факторов. Эти факторы могут быть классифицированы по причине возникновения следующим образом:

- факторы, обусловленные силовыми воздействиями на конструкцию;
- факторы, обусловленные воздействием на конструкцию воды;
- факторы, обусловленные воздействием на конструкцию высоких и низких температур;
- факторы, обусловленные воздействием на конструкцию ультрафиолетового излучения [2].

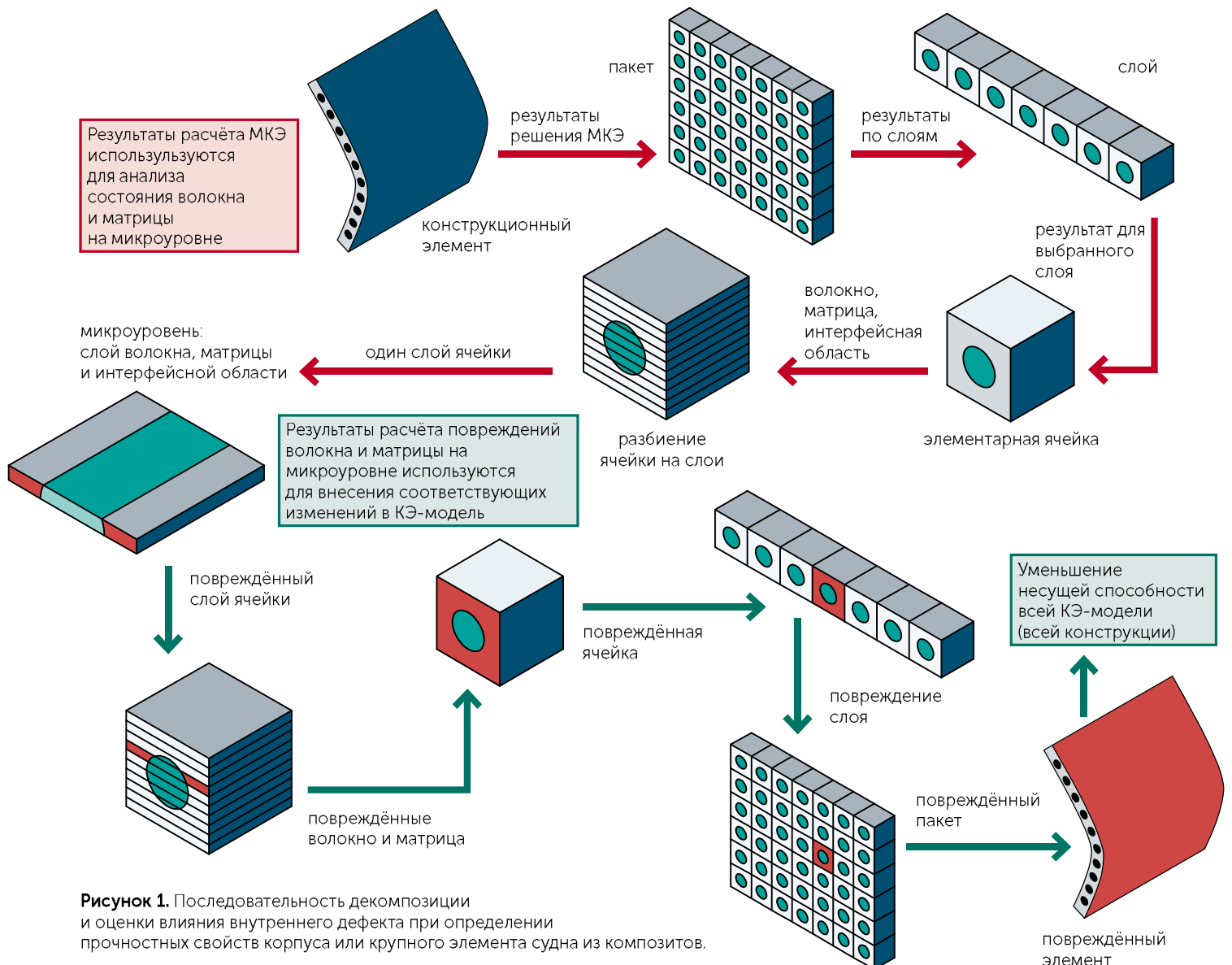


Рисунок 1. Последовательность декомпозиции и оценки влияния внутреннего дефекта при определении прочностных свойств корпуса или крупного элемента судна из композитов.

В соответствии с принципами строительной механики корабля, обеспечение прочности представляет собой сложную систему взаимодействующих между собой подсистем: нагрузки, размеров, формы конструкции и конструкционных материалов. В рамках взаимодействия этих подсистем существует целый ряд классификаций, например: внешних сил, напряжений, условий, приводящих к разрушению. На этой основе, как правило, назначаются критические пределы, а также нормы допускаемых напряжений в соответствии с системой нормирования прочности, построенной на учете статистического и отчасти временного факторов (для переменных нагрузок).

Современные трактовки вопросов нормирования прочности судов, в том числе в определенной степени судов с корпусами из композитов, дополняются следующими новыми аспектами:

- разделение начального подхода на метод напряжений и метод предельных нагрузок;
- рассмотрение комплекса классических теорий прочности и анализ их применимости к различным случаям нагружения корпусных конструкций.

Нормативными документами, например Правилами Российского Речного Регистра (далее РРР), производится учет изменения характеристик долговечности композита при эксплуатации судового корпуса путем установления соответствующих поправочных коэффициентов, учитывающих воздействие на него различных факторов эксплуатации. Коэффициенты устанавливаются в зависимости от характера действующих факторов и ряда других условий эксплуатации. Учет изменения характеристик долговечности производится двумя способами:

- уменьшением модуля упругости первого рода и коэффициента Пуассона композита пропорционально интегральному коэффициенту, представляющему собой произведение коэффициентов по каждой из групп факторов;
- увеличением значения расчетной нагрузки, действующей на элемент конструкции из композитов, пропорционально интегральному коэффициенту, представляющему собой произведение коэффициентов по каждой из групп факторов [3].

Бликие подходы имеются и в Правилах Российского Морского Регистра Судоходства (далее РМРС) [4].

При разработке судовой конструкции из композитов необходимо ясно представлять картину действующих на нее нагрузок. Это позволяет обеспечить необходимую прочность конструкции при ее оптимальных массовых параметрах. Различные элементы корпуса судна из композитов в эксплуатации находятся в различных условиях, с точки зрения действующих на них внешних усилий. Действие определенных усилий может распространяться как сразу на группу элементов корпуса из композитов, так и на отдельные

его фрагменты. Учет суммарного воздействия всех внешних усилий на элемент корпуса, как правило, затруднителен.

В строительной механике принят метод, позволяющий рассчитывать конструкции на обеспечение прочности от действия преимущественных нагрузок по отдельности и в дальнейшем суммировать их влияние. В то же время нормативными документами не устанавливается порядок учета характеристик долговечности дифференцировано для основных элементов корпуса судна из композитов.

Существует подход, при котором для оценки и прогнозирования технического состояния корпусных конструкций промышленных судов, содержащих эксплуатационные дефекты, применена теория потоков. При этом установлена взаимосвязь потока внешних нагрузок с потоком повреждений корпусных конструкций на вероятностной основе в виде результирующей функции, связывающей параметры эксплуатационного дефекта в начальный и конечный момент времени, собственно, время и вероятность возникновения дефекта [5].

Данный подход позволяет прогнозировать возникновение и развитие эксплуатационного дефекта, определять время достижения каким-либо дефектом наперед заданного уровня, оценивать вероятность достижения каким-либо дефектом наперед заданного уровня, нормировать дефекты при ограничении времени и условий эксплуатации судна, накладывать ограничения на условия эксплуатации судна с целью обеспечения экономически обоснованного жизненного цикла с заданной вероятностью.

Разработка норм проектной годности судовой корпусной конструкции из композита, при условии существования в ней внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы, тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности разрушения.

Оценка изменения характеристик долговечности представляет собой сопоставление прочностных свойств целой конструкции и той же конструкции, содержащей дефекты в начальный и конечный моменты эксплуатации, рассчитанных в соответствии с действующими нормами проектирования. Вопросы изменения характеристик долговечности тесно связаны с вопросами оценки технического состояния судовой корпусной конструкции из композита, а также методами определения степени утраты прочностных свойств и оценкой возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композита в зоне развития дефекта типа расслоение технологической и эксплуатационной природы. Все эти вопросы рассматриваются в работах [1, 6, 7].

Существует несколько точек зрения на проблему прогнозирования изменения прочности композитов. Широко распространенный традиционный путь прогнозирования и нормирования прочности корпусных конструкций, базирующийся на эмпирических подходах и непосредственном увязывании расчетных коэффициентов запаса прочности с результатами

целенаправленно поставленных экспериментов, постепенно утрачивает свою эффективность, так как они не отражают реального воздействия всех факторов эксплуатации и, как следствие, не позволяют получать корректные решения.

Кроме традиционного подхода, базирующегося на представлении о существовании некоторого критического, порогового значения прочности, после достижения которого наступает мгновенное разрушение материала, существует другой подход к трактовке явления прочности. В рамках этого подхода разрушение представляется процессом неравновесным и в большинстве случаев нестационарным. Это — кинетический подход.

В дополнение к изучению силовых факторов, анализ температурно-временной зависимости прочности как кинетического процесса позволяет сформулировать целый ряд новых критериев и теорий прочности [6–8].

Известно, что в практике эксплуатации композитов при умеренных температурах возникает явление статической усталости. Это явление универсально, оно присуще всем твердым телам. Разрушение в этом случае представляет собой необратимый кинетический процесс накопления внутренней повреждаемости материала, ускоряемый температурой. При этом становится очевидной ярко выраженная зависимость прочности элемента из композитов от продолжительности испытаний и режима нагружения. Для объяснения явления статической усталости предложен ряд теорий и критериев прочности, основанных на концепции накопления повреждений в объеме материала и учитывающих изменение во времени напряженного состояния в теле.

Введение понятия «накопление повреждений» относится к двадцатым годам прошлого столетия. Впервые оно было предложено Палмгреном. В дальнейшем этот подход получил развитие в исследовании Майнера, Бейли, Робенсона.

Для произвольных процессов нагружения во времени при простейших напряженных состояниях получил распространение критерий суммирования повреждений Бейли, дающий для времени разрушения t уравнение:

$$\int_0^t \frac{dt}{t(\sigma)} = 1 \quad (2)$$

где $t(\sigma)$ — долговечность при напряжении σ [6–8].

Исследования длительной прочности в процессе ползучести при постоянном растягивающем напряжении показали, что кинетика процесса разрушения композитов в большой степени соответствует обычной зависимости кинетических процессов, и описывается зависимостью Аррениуса:

$$t_R = a - \frac{b\sigma}{T} \quad (3)$$

где: t_R — время, прошедшее от момента приложения постоянного растягивающего напряжения σ до момента разрушения;

T — абсолютная температура;
 a, b — коэффициенты, характеризующие свойства исследуемого материала [6–8].

Результаты исследования зависимости долговечности от температуры описываются критерием Буссе, который предположил, что статическое усталостное разрушение имеет активную природу. Им предложена температурная зависимость долговечности:

$$\tau = B \exp \frac{U}{RT} \quad (4)$$

где: T — абсолютная температура;
 R — газовая постоянная;
 U — энергия активации разрушения;
 B — опытная постоянная, зависящая от напряжения [6–8].

Исследования процессов разрушения твердых тел проводились также С. Н. Журковым. Кинетическая теория прочности в его трактовке рассматривает разрушение, как процесс постепенного накопления нарушений сплошности (повреждаемости), решающую роль в котором играют тепловые флуктуации. Этот процесс начинается с момента приложения к телу нагрузки и идет практически при любом уровне нагружения. Понятие предела прочности при таком подходе теряет свой физический смысл. Фундаментальной величиной, характеризующей интегральную скорость разрушения при данной нагрузке и температуре, становится зависимость долговечности от времени с момента приложения нагрузки до разрушения элемента. Формула С. Н. Журкова имеет вид:

$$t = t_0 \exp \left(\frac{U_0 - v\sigma}{KT} \right) \quad (5)$$

где: σ — напряжение, полагаемое постоянным;
 K — постоянная Больцмана;
 U_0 — энергия активации разрушения в отсутствие напряжения [6–8].

Параметр t_0 не зависит от природы материала, величина его имеет порядок 10^{-12} – 10^{-13} с, это время соответствует примерно периоду тепловых колебаний атомов в твердом теле. Согласно кинетической теории параметр v служит показателем локальных напряжений, которые возникают на фоне средних напряжений, приложенных к телу. Чем меньше v , тем больше реальная прочность. Для каждого материала величина v является функцией его состояния, которая определяется рядом факторов, влияющих на прочность. Поэтому v является структурно-чувствительной величиной.

В формуле С. Н. Журкова все параметры являются физическими величинами, за исключением параметра v , который практически определяется опытами на длительную прочность.

Критерий Л. М. Качанова исходит из предположения, что хрупкий разрыв — это конечный результат развития дефектов материала под действием нагрузок. По этому критерию время чисто хрупкого разрушения:

$$t = \frac{1}{(n + 1)A\sigma_0^n} \quad (6)$$

где: A, n — некоторые постоянные;
 $\sigma_0 = \sigma_{max}$ — истинное максимальное напряжение [6–8].

За меру разрушения в этих критериях обычно принимается определенный параметр, который в процессе разрушения изменяется в определенных пределах. Величина этого параметра в точке разрушения считается критерием разрушения. Этот параметр, как правило, имеет конкретный физический смысл.

Наряду с изучением процессов статической усталости большой интерес для решения ряда прикладных задач, связанных с прочностью и долговечностью судовых корпусных конструкций, изготовленных из композитных материалов, представляют исследования процессов разрушения при действии интенсивных импульсных нагрузок. Специфика ударных воздействий заключается в том, что из-за малой длительности времени нагружения практически отсутствует взаимное влияние отдельных участков нагружаемого тела. В том случае, если участки этого тела содержат какие-либо крупные дефекты, их вклад в процесс разрушения ограничен [6–8].

Большинство существующих моделей динамического разрушения исходят из тех же положений, что и модели квазистатического разрушения. Методы динамического разрушения базируются на предположении о непрерывном характере роста трещин. Экспериментальные данные, однако, показывают дискретный характер роста трещины, что особенно ярко проявляется при циклическом нагружении.

Важным вопросом является исследование реакции композитов на высокоскоростное ударное нагружение, перпендикулярное плоскости армирования, при их динамическом разрушении. Результирующее разрушение зависит от многих факторов, таких как: геометрия элемента, скорость удара, свойства исходных материалов, образующих композит и многих других. Дефекты в виде растрескивания, разрушения волокон, а также образования отверстий — это лишь некоторые из возможных способов разрушения [6–8].

Динамическое импульсное воздействие на корпусную конструкцию, имеющую достаточную прочность, по всей видимости, сопровождается локальным изгибом поверхности в месте контакта. При этом одни слои конструкции оказываются растянутыми, а другие сжатыми. В этот момент на границе слоев возникают касательные напряжения между отдельными слоями конструкции из композита, приводящие к нарушению адгезионных связей между ними, которые и являются непосредственной причиной возникновения внутренних дефектов типа расслоение.

При растяжении слоистых композитов сначала происходит продольное растрескивание композита, начинающееся с матрицы, которое инициирует разрушение армирующих волокон. Продольная трещина проходит не строго вдоль них, но и перерезает часть из них. Образованная поверхность играет роль дефекта.

Группы перерезанных волокон могут отслоиться, в результате чего появляется вторичная продольная трещина, и появляются новые перерезанные волокна. Как следствие, происходит лавинообразное расслоение материала на мелкие фрагменты. Считается, что отслоение развивается, когда растягивающее напряжение σ достигает порогового значения σ_c . При этом исходная трещина поворачивает на 90° и начинает расти вдоль волокон. Таким образом, имеется конкуренция двух процессов — роста трещины поперек и вдоль волокон [6–8].

В различных работах, в том числе в [8], рассмотрены задачи растрескивания при растяжении волокнистого композита вблизи начального несовершенства в виде отверстия. При этом критическое напряжение σ_c рассчитывается по критерию Гриффитса, в котором в качестве предельного размера дефекта используется величина диаметра отверстия.

Как было сказано выше, внутренние дефекты корпусных конструкций из композитов по своей природе имеют случайный характер возникновения. Взаимосвязь между частотой возникновения внутренних дефектов типа расслоение, их количеством и размерами, а также продолжительностью и интенсивностью эксплуатации судна на качественном уровне понятна. В то же время в связи с большим разнообразием армирующих и связующих исходных компонентов композитных материалов, а также многообразия конструктивных решений, для получения каких-либо аналитических зависимостей необходим очень большой объем исследований [8].

Законченной теории разрушения композиционных материалов при действии интенсивных импульсных нагрузок пока не существует. Результаты проведенных исследований демонстрируют сложный характер этого разрушения. В то же время выяснены многие детали этого физического явления, в том числе на микроуровне. Получены важные сведения для предсказания возможности образования разрушений, разработаны численные многостадийные модели описания этих явлений. Известно, что величина разрушающего напряжения композитов при действии интенсивных импульсных нагрузок зависит от формы и длительности импульса растягивающих напряжений, напряженно-деформированного состояния среды, ряда физических и технологических факторов. Прочность при таком виде нагрузок представляет собой функцию многих переменных.

Для численного прогнозирования возможности образования разрушений при действии интенсивных импульсных нагрузок в разное время предложены критериальные соотношения аналитического вида. Простейшим и используемым на начальном этапе, по аналогии со статическим нагружением, являлась зависимость $\sigma_p = \text{const}$ [6–8].

Дальнейшее изучение процесса разрушения при действии интенсивных импульсных нагрузок показало, что этот критерий может привести к завышению величины разрушающих напряжений, но ввиду его простоты он часто применяется в инженерной практике.

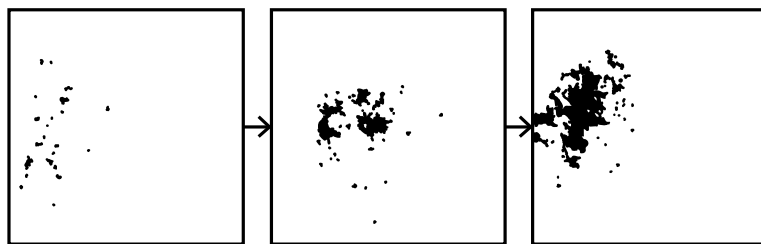
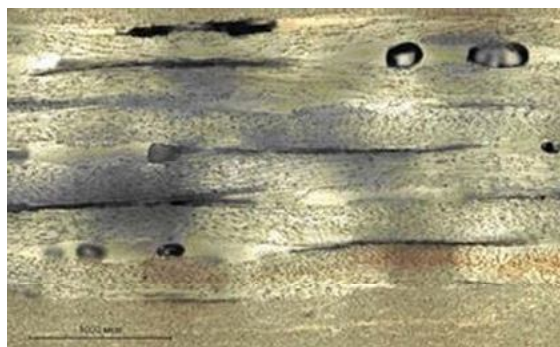


Рисунок 2. Макрошлиф с внутренними дефектами и их развитие из микроповреждений (изображения получены микроскопией и методами неразрушающего контроля).

Более полное и детальное описание процесса достигается, если процесс разрушения рассматривать как событие, протекающее во времени. При описании зависимости $s - t$ (напряжение — время) в виде совокупности реализуемых при ударном растяжении состояний, она может быть представлена в виде некоторой кривой, разделяющей плоскость на две области. Выше кривой при этом расположена область состояний, в которой происходит динамическое разрушение. Ниже кривой — находится область состояний, в которой разрушение не происходит [6–8].

Как было сказано выше, в отличие от пороговых критериев, предполагающих процесс разрушения мгновенным при выполнении некоторых критических условий, успешно разрабатываемые в настоящее время кинетические критерии предполагают развитие процесса разрушения во времени. Они базируются на определенных предположениях о механизме разрушения. Одним из наиболее распространенных подходов к общей проблеме прочности твердых тел является использование кинетического уравнения долговечности (критерий С. Н. Журкова). Однако попытки распространить его на область долговечности (от 10^{-5} до 10^{-10} с), свойственную образованию разрушений, связанных с действием интенсивных импульсных нагрузок, показали, что экспериментальные данные не описываются этим уравнением.

В то же время регистрация степени поврежденности материала в зоне разрушения в зависимости от интенсивности напряжений в проведенных различных опытах дает информацию о кинетике и характере развития процесса разрушения, и позволяет определить уровни нагружения, соответствующие зарождению повреждений на микроуровне.

Приведенное выше уравнение С. Н. Журкова позволяет определить долговечность только в условиях постоянного напряжения. Однако при практической эксплуатации судовые конструкции из композитов подвергаются действию самых различных нагрузок, меняющихся во времени. Поэтому применительно к конструкционным жестким композиционным материалам типа стеклопластика, не обладающим восстановительными свойствами, пригодную для практического применения основу дает кинетическая теория прочности в сочетании с гипотезой линейного суммирования повреждений в варианте Бейли [6–8].

Использование различных гипотез суммирования

повреждений, простейшей из которых является линейный закон, предложенный Р. Робинсоном и Д. Бейли, может оказаться приближенно верным для механизма разрушения объединяющего статические и динамические нагрузки (для хрупкого разрушения хуже, для квазихрупкого — лучше, для трещин — еще лучше). Он может позволить по уравнению долговечности рассчитать время до разрушения конструкции при любом временном режиме нагружения, в том числе и при циклическом нагружении.

Мак-Картни и Гале разработали общую теорию распространения усталостной трещины, основанную на теории дислокаций и накоплении повреждений вблизи вершины трещины. При этом предполагается, что разрушение происходит тогда, когда повреждение, накапливающееся вблизи вершины трещины, достигает критического значения [6–8].

Различные аналитические зависимости описания распространения усталостной трещины могут быть классифицированы следующим образом:

- а. Формулы, разработанные на основе теории дислокаций;
- б. Основанные на критериях линейной механики разрушения и теории размерностей;
- в. На анализе экспериментальных данных и поведения материала при циклическом нагружении и накоплении повреждений [6–8].

Особенности разрушения композитов, связанные с многообразием ситуаций, возникающих на структурном уровне армирующих элементов (дробление волокон, расслоение по границам компонентов, растрескивание матрицы), требуют создания специализированных структурных моделей материалов. В то же время имеющиеся математические модели микронеоднородных сред пока не в состоянии достаточно полно учесть многообразие реальных механизмов разрушения на микроуровне. При их применении значительная часть экспериментальной информации об отдельных особенностях разрушений в композитах на микроуровне, сопровождающихся накоплением повреждений остается без эффективного использования.

В результате анализа различных аспектов механики композитов установлены следующие особенности разрушения слоистых композитных элементов судовых корпусов:

- в начальной стадии дефект локализуется в относительно малом объеме на уровне структуры композита, образуя микроповреждение;
- макроскопическое разрушение происходит в плоскости раздела слоев, и направление развития дефекта задается расположением слоев;
- рост расслоения имеет циклический характер и состоит из периодов субравновесного состояния, инкубационной стадии, в течение которой происходит накопление микроповреждений на фронте расслоения, и его скачкообразного роста до нового субравновесного состояния.

Как было сказано выше, в качестве базовой схемы разрушения слоистых композитов судовой корпусной конструкции может рассматриваться схема, учитывающая взаимодействие между процессом накопления микроповреждений и финальным разрушением, которая имеет три возможных варианта развития:

- разрушение путем потери целостности, вследствие достижения критического значения плотности микроповреждений;
- образование сочетания дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые станут зародышами макроскопических трещин с их дальнейшим ростом;
- хрупкое разрушение, как завершение процесса накопления микроповреждений.

В качестве основной модели разрушения судовой корпусной конструкции из композитов, которая находит подтверждение в соответствующих источниках, может быть принята модель, имеющая следующие особенности:

- первичные микроповреждения композита вызваны ударными нагрузками;
- происходит образование сочетания дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые становятся зародышами макроскопических трещин (рисунок 2);
- скорость накопления микроповреждений зависит от локальных напряжений;
- характер роста макроскопического дефекта зависит от распределения микроповреждений в окрестности его фронта;
- при изгибе пластины корпуса происходит ее дальнейшее продольное растрескивание в плоскости раздела слоев;
- прочность пластины из композита уменьшается с увеличением отношения размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины, при этом прочность пластины с дефектом зависит не только от площади расслоения, но и его размеров в плане;
- влияние дефектов типа расслоение на прочность оболочки корректно учитывается за

- счет уменьшения изгибной жесткости пакета слоев в локальной зоне расслоения;
- уменьшенная изгибная жесткость рассчитывается, как суммарная жесткость независимо работающих слоев уменьшенной толщины, на которые разделяется пакет слоев;
- устойчивость элемента конструкции, содержащей дефект типа расслоение, в докритической и закритической стадии должна рассматриваться только для элементов судового корпуса, устойчивость которых проверяется при новом проектировании;
- на устойчивость пластины, содержащей дефект типа расслоение, влияет отношение размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины, при этом устойчивость пластины с дефектом зависит не только от площади расслоения, но и его размеров в плане и толщины отслоившейся части;
- влияние учёта эффектов поперечного сдвига на оценку устойчивости элемента судовой конструкции из композитов производится только для судовых конструкций, имеющих большую толщину отслоившейся части;
- рост расслоения имеет циклический характер и состоит из периодов субравновесного состояния, относительно непродолжительной инкубационной стадии накопления микроповреждений на фронте формирования расслоения, после которой происходит его скачкообразный рост за счет объединения микроповреждений на фронте до перехода макроскопического дефекта в мало поврежденную область матричной прослойки;
- усталостное поведение конструкции из композита, содержащей дефект типа расслоение, в большой степени зависит от типа и схемы армирования, при этом композиты на базе армирующих материалов в виде тканей демонстрируют повышенную усталостную прочность по отношению к композитам армированных матами;
- для описания поведения композита при разрушении корректно применима трехкомпонентная схема разрушения композита, учитывающая три моды разрушения: отрыв, продольный и поперечный сдвиги;
- модель учитывает влияние нормальных напряжений на удельную работу разрушения при сдвиге;
- удельная работа разрушения композита не зависит от моды;
- достижение напряжением по любой из мод критических значений свидетельствует о достижении дефектом предельных размеров.

Таким образом, под критерием эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна, изготовленного из композитов, находящегося в эксплуатации, с учетом возникших в процессе эксплуатации внутренних дефектов типа расслоение, может пони-

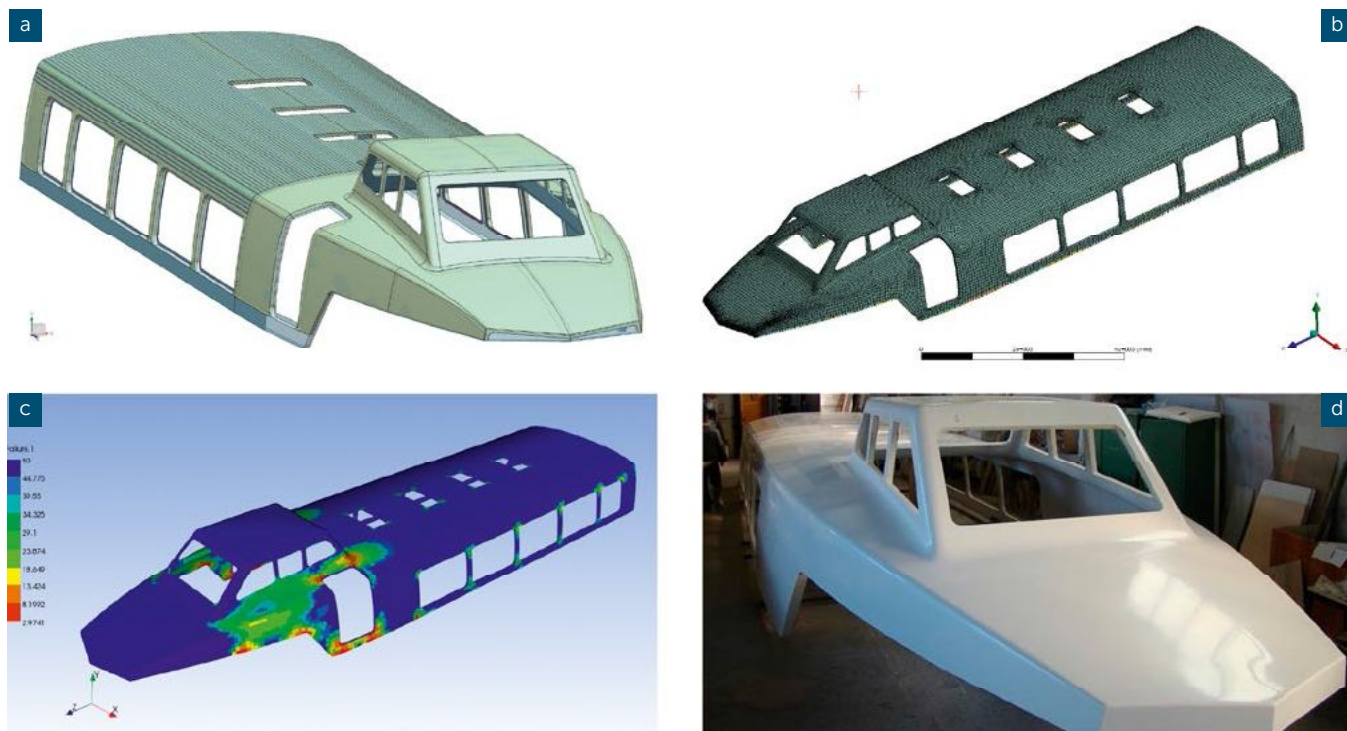


Рисунок 3. Надстройка СПК из композитов: а — исходная геометрия, б — конечно-элементная модель, с — перегрузки от изгибающего момента, д — опытный образец.

маться оценка изменений его прочностных свойств, в виде изменения расчетных напряжений, а также повышения вероятности разрушения [9].

Предельно допустимые величины геометрических параметров внутренних дефектов типа расслоение, существующих в конструкции, определяются с учетом гарантии ее целостности или практической неизменяемости формы конструкции в течение всего ее жизненного цикла. Они оцениваются с позиции обеспечения прочности конструкции, устойчивости, жесткости и долговечности (ресурса). Предельная величина утраты прочностных свойств конструкции определяется достижением геометрических параметров дефектов типа расслоение таких величин, при наличии которых уровень действующих в конструкции напряжений превышает предельно допустимый уровень, установленный нормами проектирования. В качестве опасных напряжений принимаются пределы прочности композита при сжатии, растяжении и сдвиге, уменьшенные в соответствии с ожидаемым влиянием эксплуатационных факторов, либо эйлеровы напряжения связи, определенные с учетом сдвига. Назначение опасных напряжений для судовых конструкций из композитов производится дифференцировано, в зависимости от условий работы той или иной связи. Нормы опасных напряжений учитывают длительность и характер действия нагрузки, а также изменение работоспособности конструкций с различным армированием в зависимости от этих факторов [10].

Как было сказано выше, существующий традиционный путь прогнозирования и нормирования прочности судовых корпусных конструкций, базирующийся на эмпирических подходах и непосредственном увязывании расчетных коэффициентов запаса прочности с результатами целенаправленно поставленных

экспериментов, утрачивает свою эффективность. В настоящее время для решения указанной задачи с учетом всех факторов эксплуатации, оказывающих значимое влияние на работоспособность судовых корпусных конструкций из композиционных материалов, необходимо в прогнозную расчетную схему внести предположения о накоплении повреждений в материале конструкций в процессе эксплуатации. При этом необходимо исследовать зависимости процесса накопления повреждений от уровня, длительности и характера изменения во времени силовых и климатических (прежде всего, температурных) эксплуатационных воздействий [5–10].

Решение задачи

В настоящее время в России используется большое количество программных продуктов, реализующих компьютерное моделирование при проектировании изделий из композиционных материалов. В качестве примеров таких программных продуктов можно привести программный комплекс ANSYS со встроенным программным модулем LS-DYNA и программным комплексом FLUENT, программный комплекс ABAQUS, пакет программ NASTRAN, а также программный комплекс DIGIMAT и ряд других. Работа многих программ основана на методе конечных элементов, который является численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод конечных элементов широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, аэродинамики, гидродинамики и других областей физики. Он позволяет решить большой круг инженерных задач.

Отечественными Классификационными обществами в настоящее время сертифицированы для целей проектирования судов, в том числе из композиционных материалов, два крупных программных комплекса, реализующих метод конечных элементов в различных разновидностях. Российским Речным Регистром (РРР) сертифицирован программный комплекс ANSYS, а Российским Морским Регистром Судоходства – программный комплекс NASTRAN.

В состав обоих этих программных комплексов входит программный модуль LS-DYNA, который предназначен для решения трёхмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твёрдого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач. В программном модуле LS-DYNA также реализованы явный и неявный метод конечных элементов с возможностью построения лагранжевой, эйлеровой и гибридной сетки, многокомпонентная гидродинамика, бессеточный метод сглаженных частиц, бессеточный метод, основанный на методе Галеркина. Программа имеет встроенные процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов, высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирования.

Рассмотрим последовательность проектирования такой крупной судовой конструкции из композиционных материалов как надстройка пассажирского судна на подводных крыльях с использованием программного комплекса ANSYS, выполненного под руководством автора в МГТУ им. Баумана [10] в рамках одной из Федеральных Целевых Программ.

Разработке прочностной модели надстройки пассажирского СПК из композитов предшествует разработка 3D-модели ее конструкции с использованием CAD/CAE технологий, позволяющих получить компьютерную модель, пригодную для передачи в программы конечно-элементного анализа в качестве исходной геометрии. Разработка компьютерной модели надстройки СПК проводится в два этапа.

В первую очередь разрабатывается электронная модель теоретического чертежа корпуса СПК с надстройкой из композитов. После предварительной оцифровки исходных данных в двумерном редакторе полученный промежуточный файл передается в основную среду разработки. При этом выполняется повторное согласование теоретического чертежа. В качестве базовых кривых могут использоваться кривые Безье (кубические сплайны), построенные через точки излома сечений шпангоутов в зонах, в которых форма теоретических поверхностей нелинейная в продольном направлении. Базовое семейство кривых формирует продольные и поперечные кривые компьютерной модели надстройки, которые в свою очередь формируют поверхности. Далее на основе полученных поверхностей создаются схемы армирования надстройки, схема расположения каркаса легкого среднего слоя и схема локальных подкреплений надстройки. После завершения всех процессов моделирования элементов надстройки

СПК, включая закладные детали, полученная компьютерная модель пригодна для передачи в программы конечно-элементного анализа в качестве исходной геометрии (рисунок 3).

Создание рабочего проекта производится в среде моделирования ANSYS Workbench. Первым шагом является выбор типа решаемой задачи (статический анализ) для подготовки FEM модели и дальнейшего решения задачи статики. Для моделирования композиционного материала выбирается модуль ACP. Для дальнейшего анализа на прочность надстройки из композита модули ACP (Pre) и Static Structural соединяются с ACP (Post). Далее производится импорт геометрии из внешнего файла. Импорт геометрии осуществляется через внешний файл в формате Parasolid V21.

Задание свойств композита для монослоя производится путем занесения в установленную форму характеристик материалов. После этого производится присвоение свойств материала к геометрии. При этом выбирается геометрия, и ее элементам присваиваются заранее заданные свойства материала. После этого производится задание симметричного композитного пакета, описываемого углами и толщинами укладок. После этого производится указание размеров элементов выбранных тел и число разбиений сетки на выбранных поверхностях. Следующим шагом является указание поверхностей, имеющих регулярную зону для построения конечно-элементной сетки [10].

Сетка должна разрешать интересующие зоны, подробности геометрии, а также градиенты основных переменных. Для определения зон, где возникают наибольшие градиенты, может применяться адаптация (автоматическое сгущение) сетки. При этом необходимо учитывать, что размерность сетки всегда ограничена компьютерными ресурсами. Поэтому необходимо, исходя из доступных вычислительных ресурсов, оценить максимальное количество ячеек в модели. Кроме того, необходимо определить сложность моделей и количество уравнений, решаемых для каждой ячейки.

При выборе альтернативы между структурированной сеткой гексаэдров или неструктурированной сеткой тетраэдров необходимо руководствоваться особенностями решаемой задачи. При этом нужно учитывать, что сетка гексаэдров/четырёхугольников может дать более качественное решение с меньшим количеством ячеек/узлов в сравнении с сеткой тетраэдров/треугольников.

Сетка гексаэдров/четырёхугольников в ряде случаев дает меньшую численную диффузию, но для построения такой сетки требуется больше времени и усилий.

В ряде случаев создаются гибридные сетки, которые обычно комбинируют сетку тетраэдров/треугольников с другими типами в заданных областях, например с треугольными призмами. Такая сетка дает большую точность и эффективность, чем только тетраэдры/треугольники (рисунок 3).

После разбиения надстройки на конечные элементы по поверхностям производится задание граничных



Рисунок 4. Дефектоскоп ДАМИ-С и исследование надстройки СПК из композитов методами неразрушающего контроля.

условий для надстройки пассажирского СПК. При этом запрещаются перемещения в стенке в местах отверстий по всем осям, в том числе запрещаются углы поворота (заделка). Следующим этапом является приложение к надстройке нагрузок, определенных при расчете общего изгиба корпуса СПК в различных эксплуатационных случаях, а также местных нагрузок. Вычисленные значения перерезывающей силы и изгибающего момента, а также расчетных давлений прикладываются к конечно-элементной модели для проведения расчета. Отдельным этапом является расчет устойчивости элементов надстройки СПК из композитов: для этого готовится отдельная модель. После этого производится отправка моделей в решатель.

При анализе результатов произведенных расчетов можно видеть, что прочность надстройки СПК из композитов обеспечена во всех расчетных случаях (рисунок 3). Распределение внутренних усилий, действующих в надстройке, в целом, имеет характер, описанный в специализированной литературе, что свидетельствует о корректном определении внешних нагрузок [10].

Таким образом, в среде ANSYS была создана послойная конечно-элементная модель надстройки пассажирского судна из композитов, к которой в дальнейшем были приложены внешние нагрузки, определяемые в соответствии с нормативными документами (в данном случае Правилами РРР). Понятно, что при использовании послойной модели влияние различных внутренних дефектов композиционного материала технологической и эксплуатационной природы на характеристики его прочности и долговечности не может быть учтено. Переход к моделям, учитывающим внутреннюю двухкомпонентную структуру композита (армирующие волокнистые материалы и матричная полимерная фаза), требует наращивания вычислительных возможностей проектанта на несколько порядков [10].

В работе [11] описано исследование в среде ANSYS конечно-элементной модели из девяти идентичных ячеек, воспроизводящих фрагмент композита в виде ткани Т-13 на основе стеклянного волокна плотняного переплетения на полимерном связующем. Сравнение

результатов, полученных численными методами, с результатами испытания на растяжение и сжатие экспериментальных образцов в виде пересчета дало удовлетворительную сходимость. Однако увеличение количества ячеек математической модели до физически сопоставимого с экспериментальным образцом количества ячеек дает экспоненциальный рост количества конечных элементов, что делает решение задачи численными методами нереальным или очень затратным.

Необходимо отметить, что судовые корпусные конструкции из композиционных материалов формируются из многослойных неметаллических материалов, включая легкие пенопласты. Модули упругости и плотности этих материалов могут отличаться в десятки раз. Кроме того полимерные композиты, создаваемые при изготовлении судовых корпусов, отличаются неоднородностью структуры и значительной упругой анизотропией. Многослойные конструкции имеют несколько границ раздела материалов. При этом отдельные слои часто имеют очень небольшие толщины ($0,2 + 0,1$ мм), поэтому для адекватной передачи микроструктуры такого композита необходимо разрабатывать сотни (если не тысячи) математических моделей, воспроизводящих внутреннюю структуру композита. Что может оказаться слишком затратным, а потому нереальным.

Поэтому одним из важных направлений проектирования судовых корпусных конструкций из композитов по критерию весовой эффективности являются способы верификации проектных решений. Наиболее достоверным способом верификации являются различного рода исследования судовых корпусных конструкций из композитов, как сразу после их изготовления, так и в процессе эксплуатации на их жизненном цикле, в том числе исследование методами неразрушающего контроля с одновременной аналитической обработкой полученных результатов и формированием обратных связей с процессами проектирования и изготовления конструкций. Наблюдение процессов развития внутренних дефектов в виде расслоений в процессе эксплуатации с помощью различных методов неразрушающего контроля дает возможность оценки изменения механических

свойств композиционных материалов. [12-13]

Разработка норм проектной годности конструкции с точки зрения существования в ней дефектов тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития в процессе эксплуатации и параллельного изменения прочности конструкции в сторону ее снижения. Исследования, направленные на регистрацию степени поврежденности композита в зоне разрушения, в сочетании с численными экспериментами и моделированием при помощи вычислительной техники динамических эффектов, сопутствующих разрушению матричной и армирующей фаз композита, позволяют глубже понять качественное многообразие ситуаций, возникающих при накоплении повреждений в композите на микроструктурном уровне. Выявление динамических эффектов и исследование их влияния на развитие разрушения композитов приобретает особое значение при разработке структурных моделей композитов и имитации на ЭВМ взаимодействия отдельных разрушений на микроскопическом уровне.

Различные виды дефектов в процессе эксплуатации судна могут быть выявлены исследованиями с использованием методов неразрушающего контроля. Наблюдение процессов развития внутренних дефектов в виде расслоений с помощью различных методов неразрушающего контроля дает возможность оценки изменения механических свойств композитов в процессе эксплуатации.

Исследование изготовленной судовой корпусной конструкции из композиционных материалов методами неразрушающего контроля производится со следующими целями:

- определение качества проектирования и изготовления конструкции, а также адекватности применения технологий и исходных материалов для формования композита;
- выявление мест расположения внутренних дефектов типа расслоение технологической природы для последующего определения степени влияния этих дефектов на прочностные характеристики элементов конструкции;
- соотнесение этих мест с местами вероятного возникновения внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационной природы, известными из анализа опыта эксплуатации подобных судовых корпусных конструкций из композитов, для последующей оценки возможности объединения и дальнейшего развития дефектов в процессе эксплуатации.

Подробнее этот круг вопросов рассмотрен в [12-13].

В работе [13] описано исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля (рисунок 4).

В результате исследования установлено, что наружный слой надстройки содержит отдельные внутренние дефекты типа непроклей, имеющие площадь менее 40 мм². Данный размер дефекта в соответствии с

действующими нормативами [14] рассматривается в качестве допускаемого размера, поэтому дальнейшие расчеты не требуются.

Как было сказано выше, одной из целей этого исследования было подтверждение целесообразности применения выбранных армирующих и связующих материалов для создания композита надстройки СПК, а также подтверждение правильности разработанных конструктивных схем изделия и технологий его изготовления. Количество, размеры, а также места расположения обнаруженных внутренних дефектов типа расслоение (непроклей) подтвердили правильность выбора исходных материалов, разработанной конструкции и примененных технологий для обеспечения необходимых характеристик долговечности надстройки СПК из композитов.

В местах, где в процессе эксплуатации СПК возможно возникновение внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационной природы, технологических дефектов не выявлено.

Выполненное обследование также подтвердило высокую эффективность дефектоскопа ДАМИ-С, оснащенного раздельно-совмещенным преобразователем РС-1 и акустическим сканером для дефектоскопии судовых корпусных конструкций из композитов, в том числе выполненных в виде сэндвича, для целей поиска в них внутренних дефектов типа расслоение (непроклей) технологической природы [13].

Необходимо отметить, что специфика изменения характера и механизма динамического разрушения полимерных композитов в жидкостях, в том числе связанного с изменением температуры, что свойственно, например, для наружной обшивки корпуса глиссирующего судна, создает принципиальные затруднения в разработке методов ускоренных динамических испытаний, воспроизводящих реальные условия. Подробнее вопросы прогнозирования накопления внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы, а также возникновения условий, приводящих к разрушению судовой корпусной конструкции из композитов, рассмотрены в работах [2, 6-7, 9, 12].

Как было сказано выше, законченной теории разрушения композитов при действии интенсивных импульсных нагрузок возникающих, например, на днищевой поверхности глиссирующего судна из композитов, пока не существует. При практической эксплуатации судовые корпусные конструкции из композитов подвергаются действию самых различных нагрузок, меняющихся во времени. Поэтому пока применительно к конструкционным жестким композитам типа стеклопластика, не обладающим восстановительными свойствами, пригодную для практического применения основу дает кинетическая теория прочности в сочетании с гипотезой линейного суммирования повреждений в варианте Бейли.

Использование различных гипотез суммирования повреждений, простейшей из которых является линейный закон, предложенный Р. Робинсоном и Д. Бейли, может оказаться приближенно верным для механизма разрушения объединяющего статиче-

ские и динамические нагрузки. Он может позволить по уравнению долговечности рассчитать время до разрушения конструкции при любом временном режиме нагружения, в том числе и при циклическом нагружении.

Принципы возникновения внутренних дефектов типа расслоение, их форм и места расположения на корпусе и надстройке судна из композитов, а также систематическое их обнаружение в больших количествах в определенных местах открывают путь к разработке количественных методов определения их взаимосвязи с режимами нагружения, связанными с характеристиками полной массы, мощности и скорости судна, продолжительностью и интенсивностью эксплуатации. Обработка полученных данных методами регрессионного анализа позволяет получить формализованные зависимости, позволяющие анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов. Для корректной обработки данных и получения зависимостей в виде функций необходима группировка по судам одного проекта, имеющим различный ресурс использования в достаточно больших количествах [2, 6–7, 9, 12].

Для определения технического состояния корпусов судов из композитов, находящихся в эксплуатации, был разработан способ оценки их технического состояния с использованием результатов исследований методами неразрушающего контроля [12]. Способ был запатентован. Также была разработана «Временная методика исследования корпусов судов с динамическим способом поддержания (гליссирующих) методами неразрушающего контроля с целью выявления дефектов типа расслоение», которая была утверждена Российским Речным Регистром письмом № 07-01.9-153 от 24.01.07 года. На базе Московского филиала Российского Речного Регистра в 2007–2013 годах были выполнены исследования с помощью дефектоскопии 130 корпусов судов, изготовленных из композитов, подлежащих очередному освидетельствованию по достижении пяти лет и более с момента постройки [9, 12].

На основании полученных данных произведена попытка проследить зависимость между накоплением в корпусе из композитов дефектов типа расслоение, энерговооруженностью и ресурсом использования судна. Методика учета концентрации дефектов эксплуатационного характера на корпусе судна из композитов разработана в соответствии с системой нормирования прочности, построенной на учете статистического и отчасти временного факторов (для переменных нагрузок). Расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение, в соответствии с критерием Бейли, выполнен для группы судов из композитов на основании базы данных судов, прошедших операцию дефектоскопии при освидетельствовании на предмет годности к плаванию. В качестве обобщающей характеристики принят интегральный ресурс использования, определяемый произведением энерговооруженности судна на время его эксплуатации. При расчете определялась кон-

центрация внутренних дефектов типа расслоение как отношение суммарной площади дефектов к общей площади поверхности обшивки в исследуемом районе на каждом из корпусов [9, 12]. Полученные значения величины коэффициента концентрации аппроксимированы по линейному закону:

$$K = f(t) = 0,1531t + 241,4 \quad (7)$$

где: K — коэффициент концентрации расслоений;
 t — ресурс использования корпуса.

Выполненный расчет подтверждает принципиальную возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений в варианте Бейли для анализа и прогнозирования изменения характеристик долговечности корпусов судов из композитов под действием эксплуатационных нагрузок в течение его жизненного цикла. Расчет также подтверждает существование взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками судна из композитов в виде энерговооруженности и различных форм ресурса использования и концентрацией дефектов. На начальных этапах проектирования прогнозирование изменения характеристик прочности и долговечности корпуса судна из композитов может рассматриваться как прогноз роста концентрации дефектов, описываемой значениями полученной аппроксимирующей функции на жизненном цикле [9, 12].

Выводы

Таким образом, верификация прочностных расчетов, выполненных численными методами, для судовых корпусных конструкций из композитов путем их дальнейшего исследования методами неразрушающего контроля в процессе эксплуатации позволяет оценить адекватность примененных проектных методик расчетов прочности, что позволяет в дальнейшем использовать данные методики при проектировании других судов из композитов подобных типов.

В заключение хочется привести один пример. В работе [15], описывающей применение современных средств компьютерного моделирования при проектировании и постройке скоростного пассажирского катамарана из углепластика с помощью программных комплексов ANSYS, NASTRAN и PamRTM, отмечается, что при всей целесообразности использования средств компьютерного моделирования необходимо иметь верифицированные модели для достаточно точного описания реального процесса. Верификацию необходимо проводить с использованием опытных образцов. В случае описания технологического процесса вакуумной инфузии с помощью численных методов необходимо еще более углубленное экспериментальное исследование, так как численная погрешность остается достаточно ощутимой в этом случае. Если говорить о перспективах дальнейшей работы, то необходимо провести ряд испытаний для того, чтобы добиться лучшей сходимости. Нельзя с этим не согласиться. **КМ**