

ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА ГЛИССИРУЮЩЕГО СУДНА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Описано эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок. Обоснованы причины возникновения внутренних дефектов типа расслоения, являющихся следствием воздействия на корпус из композитов гидродинамических нагрузок. Приведена обобщенная схема расположения дефектов эксплуатационного характера на корпусе. Предложена модель разрушения композиционного материала в зоне развития внутреннего дефекта типа расслоение эксплуатационной природы возникновения.

Ключевые слова: *материалы полимерные композиционные, эксплуатационное поведение, глиссирующие суда, гидродинамические нагрузки, неразрушающий контроль, внутренние дефекты типа расслоение.*

Сегодня большую часть мирового малотоннажного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов (рис. 1). Применение композитов позволяет создавать суда с высокими аэро- и гидродинамическими характеристиками, с легкими надстройками, эффективным дизайном внешнего облика и рядом других достоинств. Одним из важнейших направлений применения в судовой конструкции композиционных материалов является создание судов с повышенной вековой эффективностью. Конструкция судовых корпусов из композитов, по мере накопления опыта проектирования, строительства и эксплуатации судов из этих материалов, стала существенно отличаться от конструкции корпусов судов, изготовленных из традиционных материалов, особенно, в скоростном малотоннажном судостроении. Корпус современного скоростного судна из композитов это система поверхностей, образующих объемно – прочную конструкцию, представляющую собой многослойную оболочку. При этом каждая из поверхностей корпуса, палубы и борта имеет свой спектр механических свойств. Эти свойства могут изменяться, как по толщине поверхности, так и по ее площади. Обо-

Рис. 1. Общий вид японского промыслового судна из композитов современного типа (обводы типа «глубокое V»)



лочковые конструкции из композиционных материалов являются одним из наиболее перспективных современных видов конструкций, осваиваемых мировым малотоннажным судостроением, наилучшим образом использующими некоторые положительные качества этого типа материалов. Эти конструкции позволяют добиваться высокой весовой эффективности в сочетании с необходимыми механическими характеристиками. Одним из ключевых вопросов проектирования судовых корпусных конструкций из композитов является обеспечение их прочности и долговечности в заданных условиях эксплуатации.

В процессе эксплуатации на судна из композиционных материалов 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. В то же время, эксплуатационное поведение элементов корпуса из композитов изучено мало. В связи с этим при проектировании судовых конструкций из композитов проблемы их прочности и долговечности решаются не вполне корректно.

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.

Известно, что в конструкциях из композитов в процессе эксплуатации возникают дефекты различного характера, в первую очередь, внутренние дефекты типа расслоение. Развитие дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению ее прочностных качеств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. Оно обуславливает снижение прочности элемента корпусной конструкции за счет снижения физико-механических свойств композита. Повышается вероятность разрушения элемента конструкции. Степень влияния дефекта на характери-

стики прочности и долговечности конструкции определяется его видом, размером, местоположением, а также условиями работы композита.

Дефекты могут быть выявлены различными методами дефектоскопии, при этом предпочтительными являются акустические методы неразрушающего контроля. Акустические методы считаются наиболее перспективной группой методов неразрушающего контроля. Они получили широкое распространение во всем мире, которое обусловлено техническими, технологическими, экономическими, экологическими и другими соображениями. В качестве базовых методов неразрушающего контроля дефектов многослойных судовых корпусных конструкций из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, используются импедансный метод и локальный метод свободных колебаний. В качестве прибора, реализующего оба эти метода, используется дефектоскоп композиционных материалов ДАМИ-С.

Наблюдение с помощью инструментов неразрушающего контроля за развитием внутренних дефектов типа расслоение в композите позволяет выдвинуть ряд новых теорий и критериев его прочности, в том числе, основанных на концепции накопления повреждений. Такие исследования открывают путь к разработке количественных методов определения взаимосвязи их концентрации и мест расположения с режимами нагружения, связанными с характеристиками полной массы, мощности и скорости судна, их продолжительностью и интенсивностью. Обработка полученных данных методами численного анализа позволяет получить формализованные зависимости. Эти зависимости в дальнейшем могут позволить анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов. Проектные рекомендации, разработанные на базе этой информации, уже сейчас позволяют совершенствовать процесс разработки корпусных конструкций из композитов.

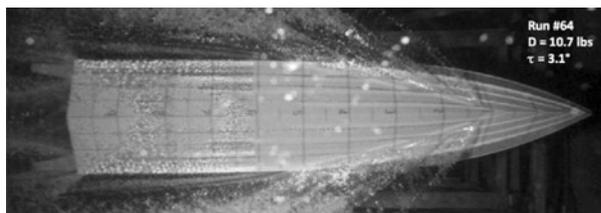
Разработка норм проектной годности судовой корпусной конструкции из композита, имеющей эксплуатационные внутренние дефекты, тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности ее разрушения.

При движении глиссирующего судна в расчетном режиме по поверхности воды на его корпусные конструкции действуют две основные группы гидродинамических нагрузок:

- гидродинамические нагрузки, обусловленные режимом прямолинейного движения по поверхности воды с большой скоростью;
- гидродинамические нагрузки, обусловленные продольными, поперечными и вертикальными колебаниями корпуса судна относительно поверхности воды.

Гидродинамические давления, действующие на погруженные конструкции корпуса глиссирующего судна, распределяются по площади погруженной части корпуса неравномерно. При движении судна с большими скоростями, существует перепад давлений в поперечном направлении его корпуса

Рис. 2. Схема брызгообразования и неравномерность распределения давления на днищевом перекрытии при движении глсссирующего судна

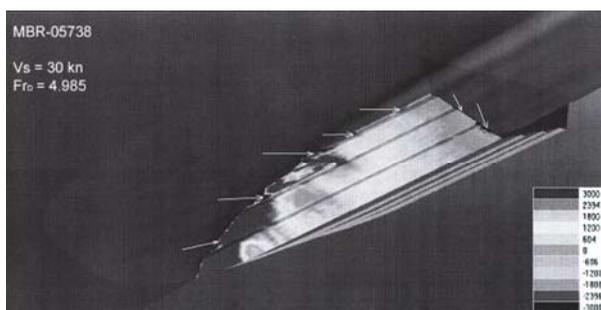


при переходе от днища к свободной поверхности. Существование перепада давлений вызывает интенсивное растекание воды поперек днища, причем у борта (скулы) вода выбрасывается в виде струй и брызг. Максимальные «пиковые» давления возникают по границам смоченной поверхности, где жидкость вытесняется с наибольшей скоростью (см. рис. 2).

В дополнение к неравномерности распределения давлений на днищевом перекрытии глсссирующего судна, на его борту, в районе границы раздела сред возникают зоны кавитации. Явление кавитации представляет собой образование в водном потоке кавитационных каверн – разрывов сплошности среды в виде отдельных полостей, наполненных водяными парами, давление в которых снижается до давления насыщенного пара. В месте замыкания кавитационной каверны происходят гидравлические удары, которые вызывают механическое разрушение материала. Кавитация – одна из основных причин эрозионного разрушения композита типа стеклопластика. Низкая кавитационная стойкость характерна для всех стеклопластиков.

На рис. 3 представлена модель распределения динамического давления по поверхности погруженной части корпуса катера в виде одной из картин визуализации физических процессов при выполнении расчета буксировочного сопротивления скоростного глсссирующего катера, имеющего обводы типа глубокое «V» численными методами. На модели распределения стрелками обозначены зоны возможного возникновения кавитации. Представленная модель распределения давлений на погруженной части корпуса судна не содержит информации о поле давлений, формируемом его движительным комплексом. Учитывая сложность согласования полей давлений корпуса и движителя численными методами, целесообразно, для получения достоверных результатов воздействия давлений от движителя на поверхность корпуса производить исследования реальных корпусов судов методами неразрушающего контроля [3].

Рис. 3. Распределение динамического давления по поверхности погруженной части корпуса катера, полученное расчетом (стрелками обозначены зоны вероятного возникновения кавитации)



В течение шести лет выполнен комплекс работ по исследованию корпусов судов из композиционных материалов возрастом старше пяти лет, находящихся в эксплуатации под техническим наблюдением Московского филиала Российского Речного Регистра. Методами неразрушающего контроля исследовано более 130 корпусов судов из композиционных материалов длиной до 27 м. Эта работа сопровождалась аналитической и методической обработкой полученных результатов. При исследовании методами неразрушающего контроля корпусов глиссирующих судов изготовленных из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации пять лет и более, как правило, внутренние дефекты типа расслоение с наибольшей частотой и в наибольшем количестве обнаруживаются в наружной обшивке корпуса в районе переменной ватерлинии. Пример расположения таких дефектов приведен на рис. 4.

Существенно более редкое скопление меньшего количества дефектов фиксируется в других местах погруженной части корпуса. Размеры, площади и концентрация дефектов увеличиваются с увеличением ресурса использования судна. Таким образом, обнаруженные в районе переменной ватерлинии на поверхности корпусов судов из композиционных материалов внутренние дефекты типа расслоение являются следствием действия гидродинамических нагрузок. Эти нагрузки действуют на днищевые конструкции корпуса глиссирующего судна. При этом зоны дефектов распределяются по площади погруженной части корпуса неравномерно, в наибольшей степени возникают по границам смоченной поверхности корпуса.

При движении в условиях волнения, которое существует на реальных водоемах практически всегда, судно испытывает продольную качку. При плавании судна на волнении отдельные точки корпуса описывают траектории, напоминающие синусоиды.

С увеличением скорости хода периодичность перемещений корпуса все более нарушается и, начиная с некоторого момента, они приобретают неупорядоченный характер. В результате действия на корпус ударных гидродинамических сил при движении на волнении он получает вынужденные вертикальные колебания, которые являются суммой перемещений, соответствующих всем формам главных свободных колебаний. Проявляющиеся в результате взаимодействия элементов корпуса с взволнованной поверхностью воды динамические нагрузки могут достигать значительных величин. При действии распределенной попереч-

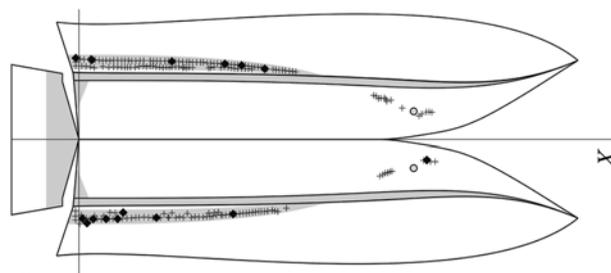


Рис. 4. Схема расположения дефектов типа расслоение, выявленных методами неразрушающего контроля, на корпусе глиссирующего судна с ЧПГВ

ной нагрузки на перекрытие, обладающее килеватой формой, возникают деформации в собственной плоскости участков этого перекрытия, ограниченной килевой линией и бортами. Одновременно пластины обшивки с поперечным набором подвергаются действию в средней части перекрытия сжимающих усилий, а у поперечных переборок и транца – растягивающих усилий. Кроме того, наблюдается значительное возрастание касательных усилий, приложенных к поперечным переборкам. Схема деформации килеватого перекрытия приведена на рис. 6, внизу слева. Следы воздействия таких усилий, передающихся с днищевой обшивки и погруженной части обшивки борта на остальные элементы корпуса, проявляются в виде внутренних дефектов типа расслоение в местах примыкания поперечных переборок к обшивке днища и борта, в ряде мест надводного борта, а также в местах примыкания фундаментов главных двигателей к обшивке днища. Обобщенная схема расположения наиболее нагруженных и уязвимых элементов судна из композиционных материалов, использующая результаты обследований более чем 130 корпусов судов из композиционных материалов, приведена на рис. 5. Зависимость концентрации эксплуатационных дефектов на корпусе глиссирующего судна от характеристик его энерговооруженности и ресурса использования приведена в [4].

Динамическое импульсное воздействие на корпусную конструкцию, имеющую достаточную прочность, по всей видимости, сопровождается локальным изгибом перекрытия 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



Рис. 5. Расположение дефектов эксплуатационной природы на корпусе судна из композиционных материалов

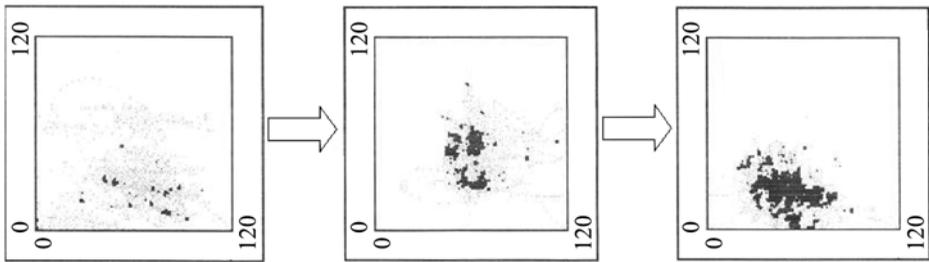


Рис. 6. Развитие дефекта из микроповреждений (изображения получены методами неразрушающего контроля)

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 рассыпание 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 [1].

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 композиционных материалов, а также многообразия конструктивных решений, для получения каких-либо аналитических зависимостей необходим очень большой объем исследований.

В результате анализа различных аспектов механики композиционных материалов установлены следующие особенности разрушения слоистых композитов 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.

В качестве основной модели разрушения судовой корпусной конструкции из композиционных материалов, 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 (см. рис. 6);
- 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 учета 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 [1, 2, 6].

Выявление и изучение влияния различных эксплуатационных факторов на развитие внутренних дефектов типа трещин и расслоений, а также самой динамики их развития, дает ключ к оценке надежности и долговечности судовых корпусных конструкций из композитов. Исследование динамики развития дефектов позволяет достоверно оценивать изменение технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации [5], прогнозировать изменение его эксплуатационной прочности в течение всего срока службы и, в конечном итоге, делать выводы о долговечности конструкции в целом. Наблюдение за процессами развития дефектов с помощью различных методов неразрушающего контроля дает возможность в режиме реального времени оценить изменения механических свойств элементов судового корпуса из композитов в процессе эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г.* Полимерные композиционные материалы. Научное издание / Долгопрудный: издательский дом «Интеллект», 2010. 354 с.
2. Межслойные эффекты в композитных материалах. Под ред. *Пэйгано Н.*, пер. с англ. под ред. *Ю.М. Тарнопольского.* М.: Мир, 1993. 347 с.
3. *Францев М.Э.* Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов // *Морской вестник.* 2008. № 4(28). С. 93–98.
4. *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.
5. *Францев М.Э.* Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации // *Контроль. Диагностика.* 2009. № 11. С. 61–68.
6. *Черепанов Г.П.* Механика разрушения многослойных оболочек. Теория трещин расслаивания // *Прикладная математика и механика.* 1983. Т. 47. Вып. 5. С. 832–845.