

# Ресурс композитов – новые данные

Михаил Францев, к. т. н., Москва  
Алексей Даняев

При проектировании судовых конструкций из композитных материалов (КМ; сейчас в основном стеклопластик в сочетании с другими материалами) допускаемые напряжения нормируются так, как это принято в строительной механике – через назначаемые коэффициенты запаса, учитывающие разнообразные факторы снижения величины допустимых напряжений относительно предела прочности данного КМ по мере выработки его рабочего ресурса. Среди этих неблагоприятных факторов – особенности рассчитываемой конструкции (степень ответственности, наличие концентраторов напряжений, характер нагрузок), схема армирования пластика, его неизбежное увлажнение и старение. Однако мы мало знаем о механизме действия этих факторов вследствие их многочисленности, трудностей учета и скудости статистических данных по ним.

Применение методов неразрушающего контроля (МНК) в процессе эксплуатации композитного судна позволяет достоверно учесть всю гамму влияющих на ресурс корпуса факторов. По данным о динамике развития дефектов в конструкциях близких прототипов уже на стадии проектирования можно делать выводы о долговечности судна. Наблюдение процессов усталостного развития внутренних дефектов (микротрещин, расслоений) с помощью различных МНК позволяет оценить изменения механических свойств КМ в процессе эксплуатации и выдвинуть ряд теорий и критериев прочности, основанных на концепции накопления повреждений.

В 2007–2010 годах с помощью МНК было обследовано 118 корпусов судов из КМ длиной от 6 до 27 м



(Францев М. Э., Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов, «КиЯ» № 212, с. 90). Обследованные корпуса имели ресурс использования в среднем не более 200 ч движения в навигацию или не более 1000 ч за 5 лет. Дефекты эксплуатационной природы возникновения классифицированы с учетом причины возникновения, характера развития, а также способа устранения (табл. 1).

На основании обследований сделан вывод, что частой причиной возникновения дефектов типа расслоения 1 рода в корпусных конструкциях являются аварийные повреждения, даже при отсутствии нарушения непроницаемости обшивки, а в некоторых случаях – и без повреждений декоративного слоя. Наибольшее количество дефектов выявлено в районе переменной ватерлинии (ПВЛ, рис. 1). Достаточно часто расслоения выявляются в районах постоянных сосредото-

ченных нагрузок – вблизи выступающих частей, особенно кронштейнов нижних опорных подшипников гребных валов, а также дейдвудов, гельм-портов и водозаборников (рис. 2). По всей видимости, их главная причина – избыточные касательные напряжения между слоями КМ, приводящие к нарушению адгезионных связей, что

и является непосредственной причиной возникновения дефектов типа расслоения 1-го рода.

Ослабленная дефектами конструкция хуже работает при действии штатных нагрузок, ее прочность понижена по сравнению с расчетной. Согласно новейшим научным исследованиям в области разрушения КМ, при достижении предела прочности на растяжение сначала происходит продольное растрескивание материала, начинающееся с полимерной матрицы, которое затем инициирует разрыв более прочных армирующих волокон. Продольная трещина

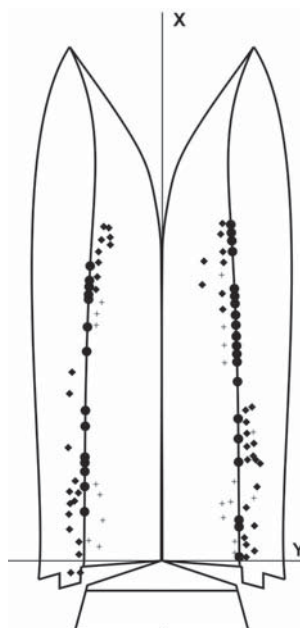


Рис. 1. Типичное расположение дефектов в пластиковой обшивке глянцевой катера. Расслоения наиболее подвержен район переменной ватерлинии

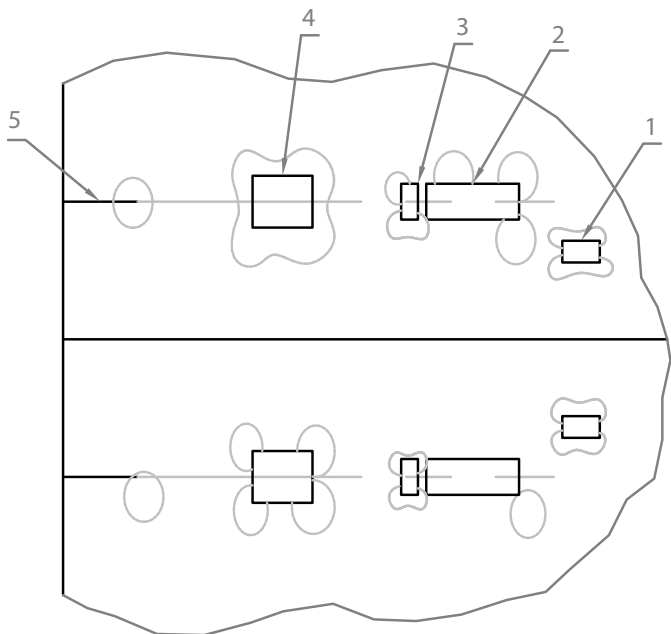


Рис. 2. Расположение дефектов типа расслоение в районе выступающих частей при отсутствии нарушений непроницаемости: 1 – водозаборник; 2 – выход дейдвудной трубы; 3 – кронштейн гребного вала; 4 – кронштейн гребного винта; 5 – кронштейн руля

проходит не строго вдоль волокон и перерезает часть из них. Группы перерезанных волокон могут отслаиваться, в результате чего появляется вторичная продольная трещина и новые перерезанные волокна; как следствие, происходит лавинообразное разрушение материала на мелкие фрагменты. Считается, что отслоение развивается, когда растягивающее напряжение  $\sigma$  достигает некоего порогового значения  $\sigma_c$ . При этом исходная трещина поворачивает на  $90^\circ$  и начинает расти вдоль волокон. Таким образом, параллельно развиваются два конкурирующих процесса – рост трещины поперек и вдоль волокон (Баженов С. Л. и др., Полимерные композиционные материалы, Изд. дом «Интеллект», 2010).

Принятая основная модель разрушения судовой корпусной конструкции из КМ, которая находит подтверждение в соответствующих источниках, обладает следующими чертами:

ударные нагрузки вызывают первичные микрповреждения КМ;

образовавшиеся дефекты в окрестности разрушенных элементов структуры становятся зародышами макроскопических трещин;

скорость накопления микрповреждений зависит от величины действующих местных напряжений;

характер роста макроскопического дефекта зависит от распределения микрповреждений в окрестности его фронта;

при изгибе пластины под действием рабочей нагрузки происходит ее постепенное продольное расслаивание с последующим снижением прочности;

уменьшенная изгибная жесткость в районе дефекта учитывается как суммарная жесткость независимо работающих слоев уменьшенной толщины, на которые разделяется ламинат;

отношение размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины влияет на устойчивость пластины, при этом устойчивость пластины с дефектом зависит не только от площади расслоения, но и от его линейных размеров и толщины отслоившейся части;

развитие расслоения имеет циклический характер, включающее стадию накопления микрповреждений на фронте формирования расслоения и затем скачкообразный рост за счет объединения микрповреждений на фронте;

усталостное поведение конструкции

из КМ, содержащей дефект типа расслоение, в большой степени зависит от типа и схемы армирования, при этом КМ на основе тканей демонстрируют повышенную усталостную прочность по отношению к КМ на основе матов;

для описания поведения КМ при разрушении корректно применима трехкомпонентная схема его разрушения, учитывающая три моды разрушения: отрыв, продольный и поперечный сдвиги; при этом удельная работа разрушения КМ не зависит от моды;

достижение напряжениями критических значений по любой из мод свидетельствует о достижении дефектом предельно допустимых размеров.

Таким образом, оценка прочности и долговечности находящегося в эксплуатации корпуса судна из КМ может производиться через учет количества и плотности возникших внутренних дефектов типа расслоение.

Несмотря на то, что в положениях действующей нормативной документации осмотические изменения поверхностей корпуса из КМ не рассматриваются, возникновение внутренних дефектов типа расслоение 2-го рода также существенно влияет на характеристики прочности корпусной конструкции. При этом необходимо помнить, что межнавигационный поверхностный ремонт корпусных конструкций, ликвидирующий внешние проявления осмоса, не устраняет образовавшиеся расслоения и, по-видимому, не прерывает дальнейшего

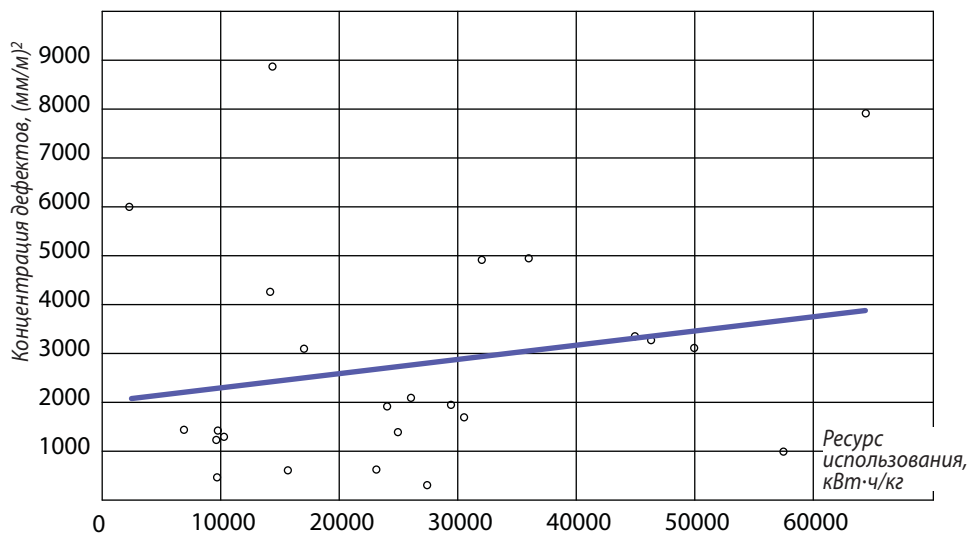


Рис. 3. Зависимость концентрации дефектов от интегральной величины в виде произведения энерговооруженности судна и ресурса использования корпуса  $(N/D) t$

Табл.1. Эксплуатационные дефекты в корпусах из КМ

Дефекты возникающие в процессе штатной эксплуатации	
Внешние дефекты	Сколы
	Наружные трещины декоративного слоя
	Отслоение декоративного слоя
	Эрозионный износ декоративного слоя
	Поверхностный осмос
	Изменение структуры декоративного слоя
Внутренние дефекты	Конструкционные трещины
	Расслоения 1 рода
	Расслоения 2 рода (осмотические)
Аварийные дефекты	
Внешние дефекты	Потертости
	Разрушение декоративного слоя
	Поверхностные царапины и трещины
Внутренние дефекты	Расслоение 1 рода
	Утрата целостности конструкции
	Нарушение геометрии

развития процесса осмотических изменений. Последние в виде расслоений 2-го рода встречаются на судах, находящихся в эксплуатации 8 и более лет («КиЯ» №212).

Исследования типов и размеров дефектов, статистическая обработка полученных данных открывают путь к разработке количественных методов определения связи концентрации дефектов с основными факторами эксплуатации – ее продолжительностью и интенсивностью. В связи с тем, что обследованные суда невозможно сгруппировать по конструктивным и технологическим признакам, полученные количественные зависимости непригодны для полноценного математического анализа, однако качественные зависимости концентрации внутренних дефектов типа расслоение 1 рода от основных эксплуатационных характеристик судна из КМ проследить можно, что тоже немаловажно.

Критерий ресурса должен учитывать возраст судна (фактор старения и деградации материала в результате воздействия внешней среды) и интенсивность нагрузок в процессе эксплуатации, оцениваемую через удельную энерговооруженность судна (кВт/т). Произведение энерговооруженности на время эксплуатации дает комплексный ресурсный параметр, который легко вычислить для исследуемых судов.

Анализ размерности критерия ресурса  $[N \cdot t / D] = \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$  показывает, что, поскольку энерговооруженность с точностью до общего пропульсивного коэффициента (примерно стабильного для глиссирующих судов) определяет достижимую судном абсолютную скорость, то  $N/D$ , умноженное на время эксплуатации, даст оценку пройденного за это время расстояния. Нет сомнений, что степень концентрации дефектов напрямую связана с ним, как это отмечается, например, в дорожной технике.

С другой стороны, размерность критерия ресурса допускает его энергетическую интерпретацию – как отношение работы внешних сил, деформирующих конструкции (и напрямую зависящих от энерговооруженности) к массе этих конструкций. Очевидно, что количество накапливающихся дефек-

тов будет расти вследствие работы переменных нагрузок пропорционально числу циклов нагружения.

На основании данных по исследованным судам выполнен расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение в соответствии со статистическим критерием Бейли (Францев М. Э., Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов, Морской вестник, 2007, № 28). Для анализа выбирались расслоения 1 рода, расположенные на поверхности корпуса в районе ПВХ пятном, напоминающим по своей конфигурации ленту. Средней линией этой ленты приближенно является действующая статическая ватерлиния. Для каждого из корпусов подсчитывались суммарное количество и площадь дефектов.

Выполненный расчет подтверждает принципиальную возможность применения для КМ гипотезы линейного суммирования повреждений в варианте Бейли при анализе и прогнозировании изменения характеристик долговечности корпусов под действием эксплуатационных нагрузок. Он также подтверждает предположение о наличии зависимости между концентрацией дефектов и эксплуатационными характеристиками судна (рис. 3).

Как видно, корреляция концентрации дефектов с ресурсом  $(N/D) \cdot t$  не слишком явная, связь здесь носит скорее качественный характер. Для получения более достоверного ре-

зультата необходимо обследование и сопоставление данных по судам, конструктивно и технологически схожим между собой. На состояние конструкций, особенно в таком проблемном районе наружной обшивки как ПВХ, влияют не только их возраст и претерпеваемые ими нагрузки, но также технологии изготовления конструкций, схемы армирования, качество материалов, история межсезонного хранения корпусов и т. п. Все это факторы, усложняющие картину явления и усиливающие разброс результатов исследования. Тем не менее, выявленные зависимости позволяют сделать некоторые важные выводы, которыми следует руководствоваться при проектировании новых судов из КМ:

при разработке конструкции корпуса проектиранту необходимо учиты-

вать картину эксплуатационных дефектов типа расслоение, выявленных на близком прототипе;

при выборе материалов, схем армирования, толщин отдельных элементов конструкции – предусматривать меры против возникновения внутренних дефектов типа расслоение в наружной обшивке корпуса, палубе, элементах верхних строений и местах их соединений;

предпринимать меры, направленные на уменьшение фильтрации воды сквозь декоративный слой с целью минимизации осмотических явлений в процессе эксплуатации;

предпринимать меры по снижению вероятности возникновения внутренних дефектов типа расслоение в местах соединения с наружной обшивкой закладных деталей, обеспечивающих крепление дейдвудов, опорных подшипников и других элементов ДРК;

при выборе цветовых решений учитывать воздействие солнечного излучения на конструкции надводного борта и верхних строений.

Большинство приведенных выводов очевидны и хорошо известны специалистам, тем не менее, вновь получаемые экспериментальные данные снова и снова требуют внимания конструкторов, технологов и эксплуатационников, занятых в сфере стеклопластикового судостроения. ■