

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ — ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ"

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ЦЕНТР им. АКАДЕМИКА В. П. МАКЕЕВА"

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ"
им. АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА"

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орган Научного совета РАН по механике
конструкций из композиционных материалов

Выпуск 3

Издается с 1981 г.

Москва 2011

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Методы контроля качества изготовления конструкций

Францев М. Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов 86

Главный редактор — *В. Г. Дегтярь*, чл.-кор. РАН,
генеральный директор — генеральный конструктор ОАО "ГРЦ Макеева"

Заместители главного редактора:

И. Н. Головатый,
директор ФГУП "ВИМИ";

Н. А. Тестоедов, д-р техн. наук, генеральный конструктор —
генеральный директор ОАО "ИСС".

Ответственный секретарь — *Л. А. Жарких*, нач. сектора ФГУП "ВИМИ"

Редакционная коллегия:

Е. И. Андреева, ФГУП "ВИМИ"; *П. И. Болтаев*, д-р техн. наук, ОАО "ГРЦ Макеева";
Э. Ф. Вайнштейн, д-р хим. наук, проф., ИБХФ РАН; *В. В. Васильев*, чл.-кор. РАН,
ОАО "ЦНИИСМ"; *В. А. Данилкин*, канд. экон. наук, ОАО "ГРЦ Макеева"; *В. Г. Дмитриев*,
чл.-кор. РАН, Корпорация "Иркут"; *А. С. Жарков*, чл.-кор. РАН, ФНПЦ "Алтай"; *В. К. Иванов*,
д-р техн. наук, проф. БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова; *С. Т. Калашников*, канд. техн. наук,
ОАО "ГРЦ Макеева"; *И. И. Кривоуцкая*, канд. техн. наук, МАИ (ГТУ); *А. Н. Лихачев*, д-р техн.
наук, БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова; *Л. И. Огородов*, канд. техн. наук, ВолГУ;
Н. Г. Паничкин, канд. техн. наук, ФГУП "ЦНИИ Маш"; *В. М. Пашин*, акад. РАН, ФГУП "ЦНИИ
им. акад. Крылова"; *М. Н. Попова*, канд. техн. наук, ВолГУ; *Л. А. Резниченко*, д-р физ.-мат. наук,
проф., НИИ физики ЮФУ; *Н. Д. Симонов-Емельянов*, д-р техн. наук, МГАТХТ; *М. И. Соколовский*,
чл.-кор. РАН, ОАО НПО "Искра"; *А. Н. Тимофеев*, канд. техн. наук, ОАО "Композит";
В. И. Халиманович, ОАО "ИСС"; *В. М. Хрулев*, д-р техн. наук, проф., НАСУ;
Г. А. Чекарева, ФГУП "ВИМИ"; *А. В. Шаргородский*, канд. техн. наук, ФГУП "ВИМИ"

Тел. (495) 491-77-67

E-mail: izdanie@vimi.ru

Статьи поступили в редакцию в марте 2011 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-35918 от 31.03.2009 г.

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной,
без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

- © Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации — федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности" (ФГУП "ВИМИ"), 2011;
- © Открытое акционерное общество "Государственный ракетный центр им. академика В. П. Макеева" (ОАО "ГРЦ Макеева"), 2011;
- © Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы им. академика М. Ф. Решетнева" (ОАО "ИСС"), 2011

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.12.001

Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов

М. Э. ФРАНЦЕВ, канд. техн. наук

АО "Нептун-Судомонтаж", г. Долгопрудный, п. Водники, Московская обл., Россия

Использование при проектировании судна из композиционных материалов (КМ) данных о динамике развития эксплуатационных дефектов в корпусных конструкциях его близкого прототипа, полученных методами неразрушающего контроля (МНК), позволяет достоверно учесть всю гамму ожидаемых эксплуатационных факторов и делать выводы об ожидаемой долговечности конструкции в целом без существенного удорожания процесса проектирования судна. Представлены модели разрушения КМ и проектные рекомендации, разработанные на базе выполненных исследований.

Ключевые слова: долговечность корпусов судов из композиционных материалов, внутренние эксплуатационные дефекты стеклопластика, методы неразрушающего контроля, проектные рекомендации.

Особенности разрушений КМ, возникающих на структурном уровне (дробление волокон, расслоение по границам компонентов, растрескивание матрицы), связаны с многообразием эксплуатационных ситуаций и 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 КМ на микроуровне. При их применении значительная часть экспериментальной информации об отдельных особенностях разрушений в КМ на микроуровне, сопровождающихся накоплением повреждений, эффективно не используется [1—3].

Необходимо отметить, что специфика изменения характера и механизма динамического разрушения полимерных материалов в жидкостях, связанного с изменением температуры и влажности материала, что характерно, например, для наружной обшивки корпуса судна с динамическим поддержанием, создает принципиальные затруднения в разработке методов ускоренных динамических испытаний, воспроизводящих реальные условия.

Исследование разрушений, связанных с действием интенсивных импульсных нагрузок на судовые конструкции из КМ, должно развиваться в нескольких направлениях. Наряду с совершенствованием техники эксперимента, расширением исследований по разработке моделей поведения конструкционных материалов в условиях интенсивных ударных нагрузок, повышением роли численного эксперимента необходима регистрация степени поврежденности материала в зоне разрушения в разных опытах.

В зависимости от интенсивности напряжений такая регистрация дает информацию о кинетике и характере развития процесса разрушения, что позволяет определить уровни нагружения, соответствующие зарождению повреждений на микроскопическом уровне. Такие исследования позволяют обнаружить и оценить процессы разрушения в КМ, проходящие задолго до их окончательного разрушения [4].

Наблюдение процессов усталостного развития внутренних дефектов в виде микро-трещин и 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 [5].

Исследования, направленные на регистрацию степени поврежденности КМ в зоне разрушения, в сочетании с численными экспериментами и моделированием с помощью вычислительной техники динамических эффектов, сопутствующих разрушению хрупких компонентов, позволяют глубже понять качественное многообразие ситуаций, возникающих при накоплении повреждений в КМ на микроструктурном уровне. Выявление динамических эффектов и исследование их влияния на развитие разрушения КМ приобретает особое значение при разработке структурных моделей композитов и имитации на ЭВМ взаимодействия отдельных разрушений на микроскопическом уровне.

В настоящее время выполняются работы по определению дефектов корпусов судов из КМ возрастом старше 5 лет, находящихся в эксплуатации под техническим наблюдением Московского филиала Российского речного регистра. Работа сопровождается аналитической и методической обработкой полученных результатов. В 2007—2010 гг. с помощью МНК было обследовано более 118 корпусов судов длиной от 6 до 27 м из КМ в соответствии с определенной методикой. Обследованные корпуса судов из КМ имеют ресурс использования, в среднем, не более 200 ч движения в навигацию или, в среднем, не более 1000 ч за 5 лет [6].

Дефекты корпусов судов из КМ эксплуатационной природы возникновения могут быть классифицированы.

Дефекты эксплуатационной природы возникновения

<i>Дефекты, возникающие в процессе эксплуатации в штатном режиме</i>	
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-го рода
	Расслоения 2-го рода (осмотические)
<i>Аварийные дефекты</i>	
Внешние дефекты	Потертости
	Разрушение декоративного слоя
	Поверхностные царапины и трещины
Внутренние дефекты	Расслоение 1-го рода
Нарушение геометрии	Утрата целостности конструкции

Данная классификация позволяет отнести все обнаруженные дефекты к одной из групп, принадлежность к каждой из которых определяет причину возникновения дефекта, ожидаемый характер его поведения и дальнейшего развития, а также способы и технологии его устранения. Дефекты всех групп в процессе эксплуатации судна взаимодействуют между собой, возникновение одних дефектов может порождать возникновение и развитие других дефектов.

Внешние дефекты корпусных конструкций из КМ по своей природе имеют случайный характер возникновения (рис. 1), поэтому невозможно установить количественные зависимости между доминирующими факторами эксплуатации, ее продолжительностью и интенсивностью. В то же время взаимосвязь между частотой возникновения, количеством и размерами внешних дефектов, а также продолжительностью и интенсивностью

эксплуатации судна на качественном уровне абсолютно понятна. При проведении операций дефектоскопии выявлены внутренние дефекты типа расслоение 1-го и 2-го рода в различных частях корпуса. Деление дефектов подобного типа является условным и связано с природой их возникновения. К дефектам типа расслоение 1-го рода относятся дефекты, связанные с силовыми воздействиями на конструкцию, химические свойства матрицы КМ в зоне дефекта не изменяются. К дефектам типа расслоение 2-го рода относятся дефекты, возникающие в виде третьей стадии осмотических изменений элемента конструкции из КМ. Химические свойства матрицы КМ в зоне дефекта изменяются. Характер этих изменений изучен пока слабо [6].

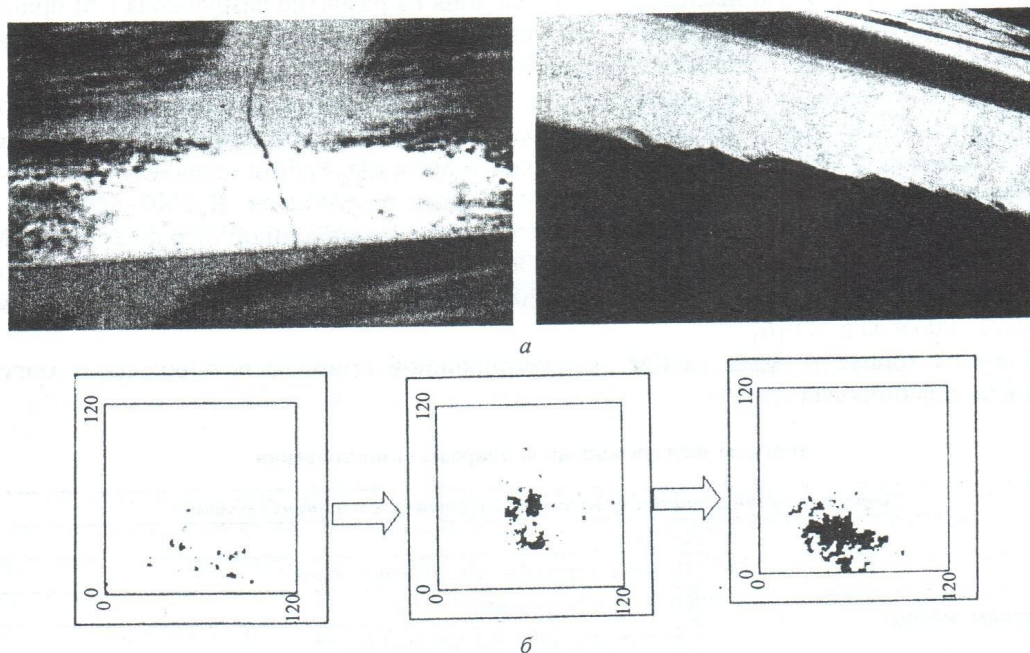


Рис. 1. Внешние (а) и внутренние (б) дефекты корпуса судна из КМ

Внутренние дефекты корпусных конструкций из КМ также имеют случайный характер возникновения. При проведении дефектоскопии в 2007—2010 гг. с использованием МНК, как правило, внутренние дефекты типа расслоение 1-го рода обнаруживались на всех обследованных корпусах судов, изготовленных из КМ. Их количество и концентрация на единице площади поверхности корпуса судна зависят от места расположения, возраста корпуса судна, конструкции, составов связующих и армирующих материалов, а также примененных схем и технологических процессов формования обшивки и связанных с ними механических характеристик судовых корпусных конструкций из КМ, условий и интенсивности эксплуатации судна. Дефектоскопом выявляются дефекты типа расслоение 1-го рода различных размеров, площадью одиночного дефекта от 4 мм^2 . Количество выявляемых внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода площадью 4 мм^2 и более составляет в среднем 150—170 дефектов на один корпус. В ряде случаев в корпусе обнаруживалось до 500 дефектов и более. Площади обнаруженных дефектов изменяются в диапазоне от 4 до 2500 мм^2 [6].

Наибольшая часть внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода на судах в возрасте от 5 до 10 лет была выявлена на поверхности корпуса в подводной части. Наибольшее количество дефектов находится в районе переменной ватерлинии. В районе надводного борта внутренние дефекты на корпусах судов в возрасте от 5 до 10 лет выявлены, в основном, только в местах воздействия сосредоточенных нагрузок (аварийные, навалы, швартовки и пр.). В ряде случаев выявляются места концентрации напряжений (район различных вырезов).

На корпусах судов, имеющих возраст 16—30 лет и более, внутренние дефекты типа расслоения выявлены практически по всей поверхности корпуса.

Дефекты типа расслоение 1-го рода выявляются также на судах, движущихся в водоизмещающем и переходном режимах. Однако столь отчетливой картины мест расположения дефектов типа расслоение 1-го рода как на глиссирующих судах не выявлено [6].

Дефектоскопией установлено, что макроскопические дефекты формируются из микроповреждений, которые накапливаются на фронте формирования макроскопических дефектов: трещин или расслоений [2].

Проведенные в 2007—2010 гг. операции дефектоскопии показали, что осмотические изменения в виде расслоений 2-го рода, как правило, встречались на судах, эксплуатируемых 8 и более лет. Межнавигационный поверхностный ремонт корпусных конструкций, ликвидирующий внешние проявления осмоса, не устраняет образовавшихся в этом месте расслоений и не препятствует, по-видимому, дальнейшему развитию процесса осмотических изменений. Об этом косвенно свидетельствует разрушение окрасочного покрытия на отремонтированных участках корпуса и обнаружение расслоений под нанесенными свежими слоями краски [6].

Корпуса судов, изготовленные из КМ, в процессе эксплуатации часто испытывают воздействия сосредоточенной нагрузки случайного характера при швартовках, навалах на причальные сооружения, касаниях грунта, а также при посадке на мель.

На основании обследований корпусов с помощью МНК можно сделать вывод, что аварийные повреждения являются частой причиной возникновения дефектов типа расслоение 1-го рода в корпусных конструкциях, даже при отсутствии нарушения герметичности, а в некоторых случаях — при отсутствии даже повреждения декоративного слоя. Схема расположения внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода в районе пятна аварийного контакта на корпусе из КМ показана на рис. 2, а.

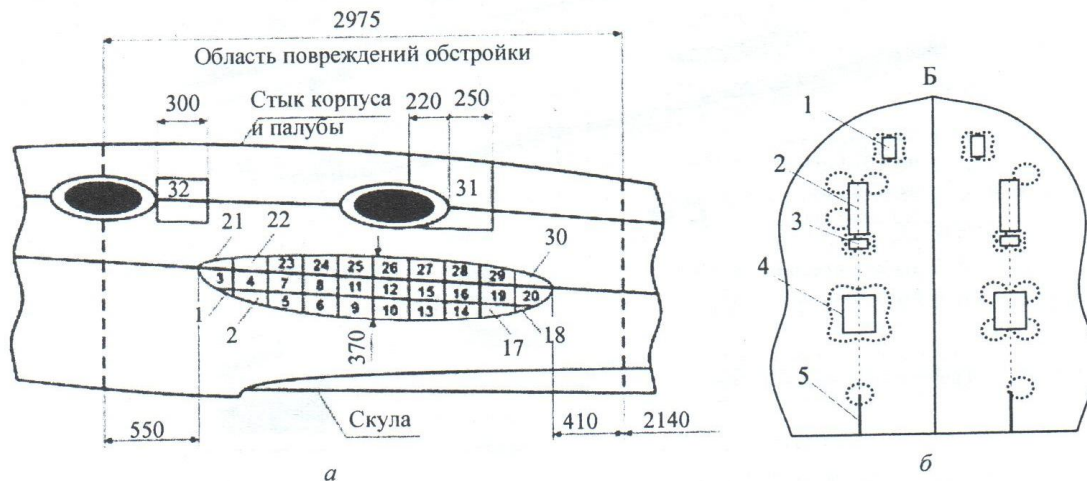


Рис. 2. Расположение дефектов типа расслоение (мм) в зоне пятна контакта при аварийном столкновении и в местах концентрации напряжений (а), а также в районе выступающих частей при отсутствии нарушений непроницаемости (б):

- 1 — водозаборник; 2 — выход дейдвудной трубы; 3 — кронштейн гребного вала;
- 4 — кронштейн гребного винта; 5 — кронштейн руля

Аварийные дефекты корпусных конструкций из КМ по своей природе имеют случайный характер возникновения. Каких-либо зависимостей между доминирующими факторами эксплуатации, ее продолжительностью и интенсивностью и возникновением дефектов аварийного характера не существует. В то же время оценка на качественном уровне объема аварийных повреждений корпусных конструкций из КМ при учете обстоятельств аварии и соотнесение объема повреждений с проектными особенностями аварийного корпуса дают неоценимый опыт анализа примененных проектных решений с точки зрения обеспечения прочности конструкции.

Наряду с поверхностью корпуса судна дефектоскопии подвергалась 100%-ная площадь мест примыкания к наружной обшивке фундаментов главных двигателей, продольного и поперечного набора, а также районов расположения и крепления движительно-рулевых комплексов, дейдвудов и подруливающих устройств, и районов вырезов в надводном борте. На отдельных высокоскоростных судах с помощью МНК были обнаружены дефекты типа расслоение 1-го рода по всей длине фундаментов главных двигателей. Достаточно часто внутренние дефекты типа расслоение 1-го рода выявляются в районах расположения выступающих частей, особенно кронштейнов нижних опорных подшипников гребных валов. Реже дефекты такого типа выявляются в районе дейдвудов, гельмпортов рулей и водозаборников систем охлаждения главных и вспомогательных двигателей. Места расположения внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода в районе выступающих частей на подводной части корпуса показаны на рис. 2, б.

Обобщенная схема расположения наиболее нагруженных и уязвимых элементов судна из КМ, по результатам обследования более чем 118 корпусов судов из КМ, приведена на рис. 3 [6].



Рис. 3. Расположение дефектов эксплуатационной природы на корпусе судна из КМ

Динамическое воздействие сосредоточенной нагрузки на корпусную конструкцию, имеющую достаточную прочность, при столкновении сопровождается изгибом днищевого, бортового или кормового перекрытий в месте контакта. При этом одни слои конструкции оказываются растянутыми, а другие сжатыми. По всей видимости при этом возникают касательные напряжения между отдельными слоями конструкции из КМ, приводящие к нарушению адгезионных связей, которые и являются непосредственной причиной возникновения дефектов типа расслоение 1-го рода [6].

Кроме того, согласно новейшим научным исследованиям в области разрушения КМ, при растяжении слоистых КМ сначала происходит продольное растрескивание материала, начинающееся с матрицы, которое инициирует разрушение волокон. Продольная трещина проходит не строго вдоль волокон и перерезает часть из них. Образованная

поверхность играет роль дефекта. Группы перерезанных волокон могут отслоиться, в результате чего появляются вторичная продольная трещина и новые перерезанные волокна и, 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 поворачивается на 90° и начинает расти вдоль волокон. Таким образом, имеются два конкурирующих процесса — рост трещины поперек и вдоль волокон [7].

При растяжении волокнистого КМ вблизи начального несовершенства в виде отверстия критическое напряжение σ_c рассчитывается по критерию Гриффитса, согласно которому в качестве предельного размера дефекта рассматривается величина диаметра отверстия [7].

В результате анализа ряда источников, посвященных рассмотрению различных аспектов механики слоистых КМ, установлены следующие особенности их разрушения:

- в начальной стадии дефект локализуется в относительно малом объеме на уровне структуры КМ, образуя микроповреждение;
- макроскопическое разрушение происходит в плоскости раздела слоев, а направление развития дефекта задается расположением слоев;
- рост расслоения имеет циклический характер и включает субравновесное состояние, инкубационную стадию, в течение которой происходит накопление микроповреждений на фронте расслоения, и скачкообразный рост до нового субравновесного состояния.

В качестве базовой схемы разрушения слоистых КМ судовой корпусной конструкции может рассматриваться схема, учитывающая взаимосвязь между процессом накопления микроповреждений и финальным разрушением, в виде образования дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые станут зародышами макроскопических трещин с их дальнейшим ростом [2, 3, 8].

В качестве основной модели разрушения судовой корпусной конструкции из КМ, которая находит подтверждение в соответствующих источниках, может быть принята модель, имеющая следующие особенности [1—3, 7—11]:

- первичные микроповреждения КМ вызваны ударными нагрузками;
- образование дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые становятся зародышами макроскопических трещин;
- 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;
- с увеличением отношения размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины, ее прочность уменьшается, она 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 в районе дефекта рассчитывается как суммарная жесткость независимо от работающих слоев уменьшенной толщины, на которые разделяется пакет слоев;
- устойчивость элемента конструкции, содержащего дефект типа расслоение, в докритической и закритической стадиях должна рассматриваться только для элементов судового корпуса, устойчивость которых проверяется при проектировании нового судна;
- 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 размеров в плане и толщины отслоившейся части;

- влияние эффектов поперечного сдвига на оценку устойчивости элемента судовой конструкции из КМ учитывается только в судовых конструкциях, имеющих большую толщину отслоившейся части;
- рост расслоения имеет циклический характер и включает субравновесное состояние, относительно непродолжительную инкубационную стадию накопления микроповреждений на фронте формирования расслоения и скачкообразный рост за счет объединения микроповреждений на фронте до перехода макроскопического дефекта в мало поврежденную область матричной прослойки;
- 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;
- модель учитывает влияние нормальных напряжений на удельную работу разрушения при сдвиге;
- удельная работа разрушения КМ 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 находящегося в эксплуатации корпуса судна, изготовленного из КМ, может пониматься оценка изменений его прочностных свойств, с учетом возникших в процессе эксплуатации внутренних дефектов типа расслоение.

Как было рассмотрено выше, поскольку внутренние дефекты корпусных конструкций из КМ по своей природе имеют случайный характер возникновения, то взаимосвязь между частотой возникновения внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода, их количеством и размерами, а также продолжительностью и интенсивностью эксплуатации судна на качественном уровне понятна.

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 как заключительной стадии осмотических изменений существенно влияет на характеристики прочности осмотической корпусной конструкции. При этом межнавигационный поверхностный ремонт корпусных конструкций, ликвидирующий внешние проявления осмоса, не устраняет образовавшихся в этом месте расслоений и не прерывает, по-видимому, дальнейшего развития процесса осмотических изменений. Последние в виде расслоений 2-го рода встречаются на судах, находящихся в эксплуатации 8 и более лет [6].

Вполне определенные принципы возникновения внутренних дефектов, их форма и места расположения на корпусе, а также систематическое их обнаружение в больших количествах открывают путь к разработке количественных методов определения их взаимосвязи с доминирующими факторами эксплуатации, ее продолжительностью и интенсивностью. Обработка полученных данных с помощью методов статистического анализа позволяет получить формализованные зависимости, необходимые для анализа и прогнозирования изменений характеристик долговечности корпусов судов из КМ. Для корректной обработки данных и получения зависимостей в виде функций необходима группировка по судам одного проекта, имеющим различный ресурс использования в достаточно больших количествах [4].

В связи с тем, что среди обследованных судов такая группировка невозможна, полученные количественные зависимости непригодны для математического анализа, однако они могут подтвердить качественные зависимости концентрации внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода от эксплуатационных характеристик судна из КМ, что тоже немаловажно.

При эксплуатации судовые конструкции из КМ подвергаются действию самых различных нагрузок, меняющихся во времени. Поэтому применительно к конструкционным жестким КМ, не обладающим восстановительными свойствами, пригодную для практического применения основу дает кинетическая теория прочности в сочетании с гипотезой линейного суммирования повреждений в варианте Бейли [4].

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

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

где $t(\sigma)$ – долговечность при напряжении σ .

На основании базы данных судов из КМ, прошедших операцию дефектоскопии в 2007—2010 гг., выполнен расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение в соответствии с критерием Бейли. В этом расчете предпринята попытка получить с помощью количественных оценок подтверждение качественной зависимости концентрации внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода от эксплуатационных характеристик судна из КМ: энерговооруженности, ресурса времени и интегрированного ресурса использования. Все расслоения, обнаруженные на корпусе в районе переменной ватерлинии, фиксируются в паспорте освидетельствования судна из КМ с указанием площади и количества.

Методика учета концентрации дефектов эксплуатационного характера на корпусе судна из КМ разработана в соответствии с системой нормирования прочности, предложенной И. Г. Бубновым, построенной на учете статистического и отчасти временного факторов (для переменных нагрузок).

Для анализа выбираются расслоения 1-го рода, вызванные действиями пиковых давлений, которые располагаются на поверхности корпуса в районе переменной ватерлинии, напоминающим по своей конфигурации ленту. Средней линией этой ленты приближенно является линия пересечения поверхности корпуса с поверхностью воды, т. е. действующая ватерлиния. Для оценки зависимости между возникновением внутренних дефектов типа расслоение 1-го рода доминирующими факторами эксплуатации и эксплуатационными качествами судов из КМ необходимо определить на каждом из корпусов суммарное количество и площади дефектов. Коэффициент концентрации дефектов рассчитывается по формуле

$$K = \frac{S_{\text{расл}}}{S_{\text{усл}}},$$

условная площадь ленты расположения дефектов может быть определена как

$$S_{\text{усл}} = P_{\text{усл}} C_{\text{ср}},$$

а условный периметр ленты может быть рассчитан как

$$P_{\text{усл}} = 2,4L + B,$$

где L — расчетная длина корпуса, м;

B — расчетная ширина корпуса, м.

При расчете координаты расположения пятен дефектов типа расслоение по ширине рассматриваемой ленты на остроскулом корпусе определяются как расстояние от центра расположения пятна дефекта до скулы. По техническим условиям использования прибора пятна дефектов делятся на элементарные площадки, имеющие размеры 120×120 мм.

Средняя ширина ленты (м) для всего ее периметра определяется как

$$C_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i' - Y_j'') + 0,12}{n},$$

где n — общее количество дефектов на ленте.

Как правило, одной и той же координате X по длине соответствуют две координаты Y_i и Y_j , соответствующие центрам наиболее удаленных и наиболее близких от скулы пятен дефектов. Координата наиболее удаленной от скулы границы расположения пятен дефектов (м) определяется как

$$Y' = Y_i + 0,060.$$

Соответственно, координата наименее удаленной от скулы границы расположения пятен дефектов (м) может быть определена как

$$Y'' = Y_j - 0,060.$$

Ширина ленты двух площадок дефектов, имеющих одну координату X по длине, может быть определена следующим образом

$$C = Y' - Y'' = Y_i + 0,060 - Y_j - 0,060 = Y_i - Y_j + 0,12.$$

Если одной координате X соответствует только одна координата Y , то в этом случае $Y_1 = Y_2$.

Общая площадь расслоений в целях определения их концентрации на корпусе определяется как

$$S_{\text{расл}} = \sum_{i=1}^n S_i n_i,$$

где S_i — площадь i -го дефекта;

n_i — количество дефектов на элементарном участке 120×120 мм.

По данным паспортов освидетельствования проводится суммирование дефектов, расположенных на ленте. Полученные значения величины коэффициента концентрации аппроксимируются по линейному закону.

Выполненный расчет подтверждает принципиальную возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений в варианте Бейли для анализа и прогнозирования изменения характеристик долговечности корпусов судов из КМ под действием эксплуатационных нагрузок. Расчет также подтверждает существование взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками судна из КМ в виде энерговооруженности и различных форм ресурса использования и концентрацией дефектов (рис. 4).

Таким образом, прогнозирование изменения характеристик долговечности корпуса судна из КМ может рассматриваться как расчет значений функции на определенном интервале

$$K = f(t),$$

где K — коэффициент концентрации расслоений;

t — ресурс использования корпуса.

Для получения формализованных зависимостей, позволяющих анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из КМ, требуется обработка данных с помощью методов статистического анализа по достаточно большому количеству судов.

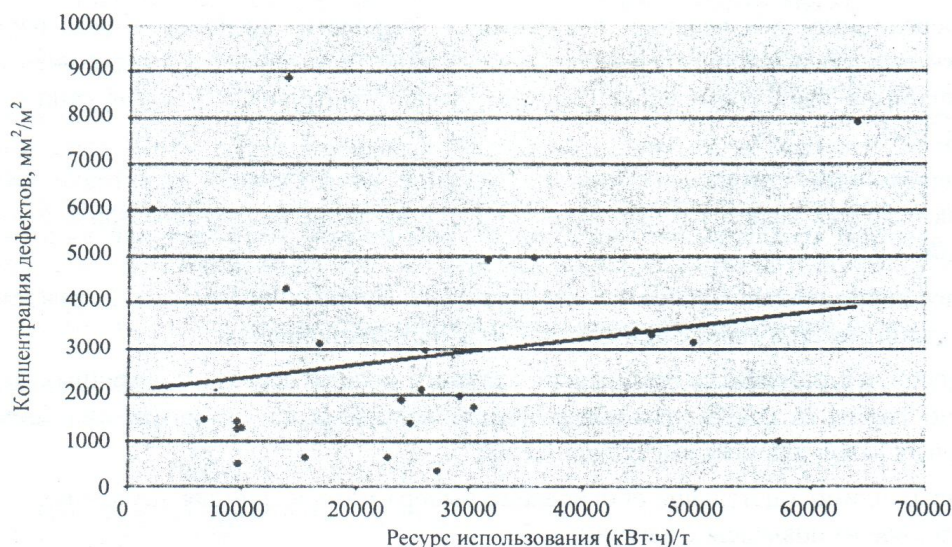


Рис. 4. Зависимость концентрации дефектов от интегральной величины в виде произведения энерговооруженности судна и ресурса использования корпуса (N/D) t

Дополнительно к приведенной на рис. 3 схеме, можно сделать следующие выводы, рассматриваемые в качестве проектных рекомендаций:

- при разработке конструкции корпуса судна из КМ необходимо руководствоваться схемой расположения эксплуатационных дефектов типа расслоение, выявленных на близком прототипе;
- при разработке композиции, схем армирования КМ на корпусе судна, выборе толщин отдельных элементов конструкции необходимо осуществлять проектные мероприятия, направленные на уменьшение возможности возникновения внутренних дефектов типа расслоение в наружной обшивке корпуса, палубе, элементах верхних строений и местах их соединений;
- при разработке композиции и схем армирования КМ на корпусе судна необходимо также осуществлять проектные мероприятия, направленные на уменьшение фильтрации воды сквозь декоративный слой и добиваться уменьшения связанных с ней осмотических изменений поверхностных слоев в процессе эксплуатации;
- при разработке конструкции наружной обшивки набора, фундаментов и подкреплений необходимо осуществлять проектные мероприятия по уменьшению возникновения внутренних дефектов типа расслоение в местах соединения этих элементов и в приформовках, соединяющих между собой эти элементы;
- при разработке конструкции закладных деталей, обеспечивающих крепление конструкций дейдвудов, опорных подшипников и других элементов движительно-рулевых комплексов к корпусу судна, необходимо осуществлять проектные мероприятия по уменьшению возникновения внутренних дефектов типа расслоение в местах соединения закладных деталей с наружной обшивкой;
- при разработке конструкции проходящих сквозь наружную обшивку элементов типа водозаборников и газовыхлопов необходимо осуществлять проектные мероприятия по уменьшению возникновения внутренних дефектов типа расслоение в местах прохода этих элементов через наружную обшивку корпуса;

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

На стадии конструирования корпуса судна из КМ целесообразно осуществлять следующие конструкторско-технологические мероприятия:

- необходимо обеспечение повышенной твердости внешних слоев наружной обшивки корпуса в районе переменной ватерлинии и в других местах концентрации напряжений за счет применения соответствующих матричных и армирующих материалов;

- необходимо специальное конструирование конфигураций окантовки оконных проемов и других вырезов в наружной обшивке в районе надводного борта и верхних строений;

- необходимо специальное конструирование опорных поверхностей фундаментов главных двигателей в районе примыкания их к наружной обшивке;

- требуется разработка специализированного конструирования закладных деталей, особенно формы их контактных поверхностей, например, под дейдвуды или кронштейны гребных валов и другие выступающие части;

- необходимо тщательное обоснование выбора материалов для закладных деталей, направленное на повышение адгезии;

- необходимо обоснование выбора клеевых комбинаций для приклеивания различных деталей, особенно закладных деталей к внутренней поверхности корпуса.

Таким образом, использование при проектировании нового судна из КМ экспериментальных данных о динамике развития эксплуатационных дефектов в корпусных конструкциях его близкого прототипа, полученных методами неразрушающего контроля, позволяет достоверно учесть всю гамму ожидаемых эксплуатационных факторов и не приводит к существенному удорожанию проекта.

Л и т е р а т у р а

1. Бохоева Л. А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами. — Улан-Удэ, 2007. — 192 с.
2. Васильев В. В., Протасов В. Д., Болотин В. В. и др. Композиционные материалы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
3. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
4. Францев М. Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов// Морской вестник. 2007. № 4(28). С. 93—98.
5. Потапов А. И., Пеккер Ф. П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. — Л., 1977. — 192 с.
6. Францев М. Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов// Катера и яхты. 2008. № 2(212). С. 90—93; № 3(213). С. 102—105.
7. Баженов С. Л. и др. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. — Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2010. С. 90—117.
8. Черепанов Г. П. Механика разрушения многослойных оболочек. Теория трещин расслаивания// Прикладная математика и механика. 1983. Т. 47. Вып. 5. С. 832—845.
9. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. — М.: Машиностроение, 2003. — 447 с.
10. ОСТ 5.1068-75 "Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности". — Л.: ЦНИИТС, 1975.
11. Шпакова Ю. В. Статическая прочность и колебания подкрепленных оболочек вращения из слоистых композиционных материалов. Дис... на соиск. ученой степени канд. наук. — г. Томск, 2007.

The project recommendation for definition of the most loaded and vulnerable elements of boat hull from composites

M. E. FRANTSEV

Company "Neptun-Sudomontazh", Dolgoprudny, Vodniki, Moscow region, Russia

The using for projects of boat from composites the data about the dynamics of development of exploitation defects in prototype's boat hull by methods of non-destructive testing allow to consider all exploitation factors which are expected for new boat. Also it allows forecasting the change of strength of boat hull for time of service. It allows concluding about expected durability of construction from composites without significant rise in price of project. The boats which have time of service for more five year have been studied for definition internal defects type delamination. The conclusions which can consider as project recommendations and the special design and technologies use for construction of boat hull from composites for decrease of internal defects type delamination during exploitation are in this article.

Keywords: durability of boat hull from composites, internal defects of fiberglass plastics during exploitation, methods nondestructive testing, project recommendation.

Францев Михаил Эрнестович, директор.
Тел. 8 (903) 717-31-25.