

Михаил Францев, инженер-кораблестроитель, канд. техн. наук,
член Научно-технического совета Российского Речного Регистра

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ КОРПУСОВ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СУДОВ



В настоящее время весьма большую часть отечественного малотоннажного флота составляют суда с динамическими принципами поддержания (СДПП), имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов (обычно стеклопластиковые и клеенные пластиком деревянные – прим. ред.).

Максимальный срок гарантийных обязательств, который устанавливают производители для корпусов судов, поставляемых на российский рынок, составляет, как правило, один год на конструктивную целостность и пять лет на возникновение необратимых осмотических изменений в корпусе. По окончании гарантийного срока, установленного фирмой-изготовителем на корпусные конструкции судна, оценка их технического состояния является обязанностью и прерогативой органов, осуществляющих техническое наблюдение и надзор за судами, и предметом специальных процедур. Как правило, документ, отражающий пригодность судна к эксплуатации, выданный соответствующим надзорным органом, служит основанием для заключения договора страхования судна от ущерба. При этом бывает, что в дальнейшем, при наступлении страхового случая, связанного с причинением большого ущерба, страховые компании затрачивают массу усилий на опротестование такого документа.

В связи с этим перед организациями, осуществляющими техническое наблюдение и надзор за композитными судами в процессе их эксплуатации, в частности Российским Речным Регистром, а также судовладельцами и страховыми компаниями, возникают проблемы с достоверной оценкой технического состояния корпусов таких судов. Все перечисленные субъекты отечественного судоходства с ними в массовом порядке столкнулись впервые.

Виды дефектов пластиковых корпусов

Современные скоростные суда с корпусами, изготовленными из композиционных материалов, имеют главные размерения и характеристики, изменяющиеся в довольно широком диапазоне. Длина их может достигать более 20–25 м при мощности главных двигателей 1500 л.с. и более, что обеспечивает судну скорость в пределах 60–70 км/ч. Корпус современного, как правило скоростного, катера из композитов, эксплуатируемого в условиях высоких динамических нагрузок, – это система поверхностей, образующих объемно-прочную конструкцию. И корпус без

палубы, и палуба без корпуса не обладают достаточной прочностью и жесткостью. Только после соединения их в единое целое, установки в жесткий контур продольных и поперечных переборок они приобретают необходимые прочностные качества. При этом каждую из поверхностей корпуса и палубы отличает свой набор механических свойств, которые могут изменяться как по толщине поверхности, так и по ее площади. Возникающие в такой конструкции дефекты становятся важным фактором, ухудшающим ее эксплуатационные качества и сокращающим срок службы корпусов судов из композиционных материалов.

Согласно практике, сложившейся в мировом судоходстве, одним из достоверных критериев оценки эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна является динамика развития в нем различных дефектов и износов, ведущих к снижению его прочностных качеств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. По достижении дефектом или износом определенных размеров напряжения, действующие в конструкции в районе его расположения, начинают превышать пределы прочности, установленные проектантом и изготовителем судна в качестве допустимых. Это может привести как

к разрушению конструкции при расчетных режимах движения, так и к непропорциональному увеличению зоны аварийных разрушений при нештатных эксплуатационных ситуациях. И те, и другие случаи на водных путях России в настоящее время встречаются довольно часто.

В отличие от других материалов, применяемых для изготовления корпусов судов, композит типа стеклопластика в процессе старения мало изменяет свой внешний вид и размеры. В ряде случаев состарившийся расслоившийся стеклопластик с восстановленным декоративным покрытием внешне почти не отличается от нового материала. Поэтому анализ изменения геометрических размеров конструкции из композиционных материалов при эксплуатации (как это принято в металлическом судостроении) не имеет смысла.

Ниже приведена классификация дефектов полиэфирного стеклопластика, позволяющая учитывать взаимосвязь между дефектами, образовавшимися в композите в процессе его изготовления, и возникающими эксплуатационными дефектами. Почти все виды рассматриваемых в ней дефектов могут быть обнаружены: одни визуально, другие – с помощью методов неразрушающего контроля, что открывает путь для их нормирования, т.е. разделения на допустимые и недопустимые.

Все дефекты судовых стеклопластиковых конструкций можно отнести к двум большим группам: наружные и внутренние.

К наружным дефектам декоративного слоя относятся:

- неровности;
- раковины;
- выделение текстуры армирующего материала;
- отслоение;
- вспучивание;
- трещины;
- эрозионный износ.

Внутренними дефектами (в ламинате) считаются:

- воздушные включения;
- пористость армирующего материала;
- пористость полимерной матрицы* (полимеризовавшегося связующего);
- неполная полимеризация;

- посторонние включения;
- отклонения в массовом соотношении связующего и армирующего материала;
- расслоения;
- трещины в матрице*;
- изменения внутренней структуры композита, связанные с воздействием на него агрессивных сред (осмос).

В определенной степени вероятность возникновения дефектов в композите связана со способом обработки армирующего материала перед пропиткой его связующим, методами и режимами его изготовления и пр. Некоторые из перечисленных дефектов возникают вследствие различного рода отклонений технологии формирования корпуса малого судна от стандартной. Поэтому они возникают в композите на стадии его изготовления и, как было сказано выше, влияют на скорость возникновения и распространения эксплуатационных дефектов.

Влияние каждого вида дефекта на физико-механические свойства готового стеклопластика различно. Такие наружные дефекты, как неровности, раковины и трещины в декоративном слое, выделение текстуры стекловолокна на поверхности конструкции в начальный период эксплуатации судна заметного влияния на механические свойства материала не оказывают. Однако со временем, если конструкция работает в условиях агрессивных сред, эти поверхностные дефекты могут привести к значительному ослаблению материала. Это особенно проявляется при выделении текстуры стеклоткани на поверхности конструкции, контактирующей с какой-либо агрессивной для стеклопластика жидкостью, например с водой. Под действием воды незащищенное смолой стекловолокно разрушается, что приводит к снижению прочности и жесткости композита и, следовательно, к сокращению срока эксплуатации судна.

Влияние внутренних дефектов в отличие от внешних дефектов, как правило, отражается на физико-механических характеристиках стеклопластика с самого начала, причем со

* Данный термин не имеет отношения к матрицам как технологической оснастке. – Прим. ред.

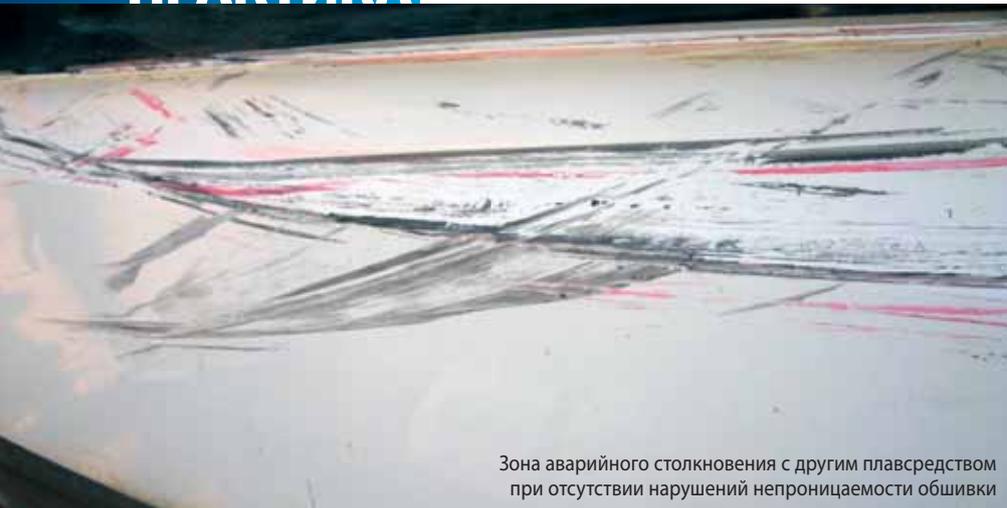
временем это влияние усугубляется и чаще всего является негативным. Степень влияния определяется видом дефекта, его размером, местоположением и условиями работы материала. Степень снижения механических свойств дефектного стеклопластика зависит как от типа связующего и армирующих материалов, так и от технологии его формования.



Разрушение ремонтного слоя краски в районе осмотических изменений в обшивке днищевой части корпуса яхты «Princess 52» 1998 г. выпуска

Присутствие одних видов дефектов бывает тесно связано с наличием других: например, появление трещин очень часто – следствие избытка связующего. В то же время недостаточное количество связующего ведет к плохой пропитке армирующего материала, ослаблению связей между соседними слоями и быстрому появлению расслоений. Поэтому не всегда удается выделить влияние отдельного вида дефекта на физико-механические характеристики всей конструкции. Однако из опыта известно, что наибольшее влияние на работоспособность конструкции из композиционных материалов оказывают дефекты типа «расслоение» и дефекты, связанные с воздействием на композит агрессивных сред, в частности, воды, больше известные под обобщающим названием осмос.

Расслоение в композиционном материале – один из наиболее распространенных дефектов, возникающих и в процессе изготовления судовых конструкций из стеклопластика, и при эксплуатации. Расслоения первого рода, как правило, обусловлены слабой адгезией между отдельными слоями армирующего материала из-за неравномерного распределения связующего. Места, обедненные связующим, не обеспечивают хорошей связи между соседними слоями



Зона аварийного столкновения с другим плавсредством при отсутствии нарушений непроницаемости обшивки



Трещина в районе Mortиры гребного вала катера «Sunseeker 44 Camargue» после поверхностного ремонта



Скол декоративного слоя на скуле катера «Regal 2150 LSE»



Поперечная трещина в редане катера «Bella»

армирующего материала. Слабая адгезия наблюдается и в том случае, когда процесс изготовления конструкций (вследствие технологических условий или производственной необходимости) прерывается. При возобновлении работ стекловолоконный материал укладывается на отвержденную поверхность стеклопластика, которая кое-где может оказаться неровной. В этих местах при уплотнении новые слои армирующего материала недостаточно прилегают к старым. При этом адгезия между слоями ухудшается, иногда и вообще нарушается, что приводит к частичному расслоению. Особенно часто расслоения стеклопластика встречаются в местах перегиба конструкций, имеющих резкие переходы из одной плоскости (скула, линия примыкания транца) в другую; в местах стыкования и перехлеста слоев наружной обшивки судна, в местах расположения деталей, изготовленных из вспененных структур, а также в приформовках переборок и набора. Слои соединительных накладок приформовочных угольников укладываются на поверхность полностью отвержденного стеклопластика. Качество соединения в этом случае зависит в основном от подготовки поверхности соединяемых конструкций. Некачественная подготовка поверхности приводит к отслоению соединительных накладок. Расслоения часто появляются при приформовке в виде пакета, уплотнить который за одну операцию значительно труднее, чем слой армирующего материала.

Одной из причин возникновения внутренних дефектов типа «расслоение» в корпусе СДПП в процессе

эксплуатации служат ударные нагрузки, сопровождающиеся брызгообразованием у поверхности корпуса. Известно, что при движении судна с большими скоростями возникает резкий перепад давлений в поперечном направлении при переходе от днища к свободной поверхности, вызывающего интенсивное растекание воды поперек днища, причем у борта (скулы) вода выбрасывается в виде струй и брызг. По-видимому, при этом на ограниченных участках развиваются пиковые давления, действие которых на композит эквивалентно удару. Степень влияния этих нагрузок тем выше, чем больше угол между направлением движения брызг и поверхностью корпуса*.

Надводный борт и палубные конструкции судна, изготовленного из композиционных материалов, подвержены периодическому многоцикловому температурному воздействию, обусловленному влиянием атмосферных явлений и солнечной радиации. Ежегодный диапазон изменения температур в средней полосе России может составлять более 110°C (от -40°C до +70°C с учетом прогрева солнечными лучами). При изменении температуры в пакете слоев многослойного материала типа стеклопластика возникают термические (остаточные) напряжения и деформации в составляющих пакет монослоях, которые и становятся дополнительным фактором, обуславливающим возникновение и развитие в конструкциях, например в надводном борте или палубе, дефектов типа «расслоение». В качестве примера можно привести факт обнаружения скоплений большого количества макроскопических дефектов в конструкциях надводного борта судна, корпус которого был окрашен в темно-синий цвет. В конструкциях судна этого же проекта, построенного той же верфью на полгода раньше и эксплуатировавшегося в аналогичных условиях, но имеющего надводный борт белого цвета, были зафиксированы только обширные скопления микроповреждений.

Циклические нагрузки, вызванные

* Фактически здесь на угол выброса брызговой струи влияет местная килеватость днища, и определяющая в основном величину динамических нагрузок на него. – Прим. ред.

общим продольным и поперечным изгибом корпуса, приводят к образованию расслоений в ослабленных сечениях корпусных конструкций, например в участках палубы между бортом и кокпитом. Этот вопрос нуждается в более глубоком изучении.

Расслоения заметно влияют на прочность стеклопластика, особенно при сдвиге, изгибе и сжатии. Занимая площадь до десятков квадратных сантиметров, расслоения могут существенно отразиться на несущей способности конструкции. Резко очерченные острые края расслоений являются концентраторами напряжений и понижают механические свойства материала. Ослабляя полимерную матрицу и разъединяя отдельные слои армирующего материала, они препятствуют равномерному распределению напряжений по сечению этого материала, в результате чего снижается его предел прочности.

Наряду с развитием расслоений, водопоглощение или, как его еще называют, осмос* является важным фактором снижения эксплуатационных качеств корпусных конструкций. Процессы развития осмоса многообразны, но в целом они могут быть отнесены к трем основным типам явлений, а именно, капиллярным явлениям, гидролизу и изменению внутренней структуры композита вследствие разрушения адгезионных и когезионных связей.

При капиллярных явлениях вода может проникать в композит через микропоры в отвердевшем связующем, а также вдоль границы контакта волокна со смолой. Увеличение массы стеклопластиковых образцов за счет водопоглощения составляет до 0.3–0.5% за 10 суток при закрытых торцах армирующего материала и до 2.5% – при незащищенных торцах. Потеря прочности корпусных конструкций может достигать при этом 15–55% в зависимости от гидрофобных качеств армирующих волокон. В еще большей степени склонен к водопоглощению порис-

тый материал заполнителя трехслойных конструкций. Повышенное содержание влаги внутри корпусных конструкций из композиционных материалов типа стеклопластика приводит к гидролизу с появлением внутри материала химически активных веществ – продуктов разложения.

Процесс гидролиза – насыщение водой материалов слоистой конструкции из стеклопластика, который приводит к появлению внутри нее ряда гигроскопических продуктов. Механизмом этого процесса является ослабление силы раствора путем введения растворителя через полупроницаемую мембрану.

Модель этого процесса может быть представлена как замкнутая ячейка, содержащая два раствора различной плотности (или химического потенциала), разделенных мембраной. В стеклопластиковом корпусе судна роль мембраны играет декоративный слой, а роль растворителя – вода. Эта «мембрана», подобно очень тонким фильтрам, способна пропускать только молекулы малого размера. Она легко пропускает простые молекулы воды, а ее проницаемость для сложных молекул – продуктов разложения матрицы (полимеризованного связующего) существенно ограничена. Растворитель в данной ячейке, стремясь сбалансировать концентрацию двух растворов, перетекает сквозь мембрану в направлении раствора с большей плотностью, т. е. внутрь корпуса. Данный процесс имеет тенденцию продолжаться до достижения равновесия. В результате более концентрированный раствор неизбежно увеличится в объеме. Для стеклопластика корпуса это означает, что внутри него возрастет давление. Разница давлений между двумя растворами называется осмотическим давлением.

Дальнейшее протекание осмоса характеризуется разложением полимерной матрицы на исходные компоненты. При этом в водном растворе внутри корпусной конструкции из композиционного материала повышается концентрация продуктов разложения, включая различные кислоты, высокомолекулярные спирты и другие соединения. Благодаря своим физическим и химическим свойствам эти продукты разложения, од-

нажды образовавшись, способствуют дальнейшему постепенному насыщению корпуса влагой. В целом уже на стадии гидролиза начинаются необратимые изменения, ведущие корпусную конструкцию к дальнейшему постепенному разрушению.

Финальной стадией изменений, связанных с водопоглощением стеклопластика корпуса, является его расслоение. На этом этапе из-за структурных изменений полимерной матрицы ослабевают связи, обеспечивающие адгезию монослоев между собой и когезию внутри слоев. Слои армирующих материалов под действием осмотического давления начинают отслаиваться один от другого подобно слоям шпона в старой фанере с существенной потерей прочности конструкции. Дополнительно процесс усугубляется промораживанием осмотических полостей с одновременным увеличением их в объеме.

С момента первого спуска на воду корпус судна из композиционных материалов начинает поглощать влагу, которая фильтруется внутрь слоев стеклопластика. Проверка корпуса с помощью соответствующих приборов в конце навигации, как правило, выявляет высокое содержание влаги. Оно должно существенно снизиться спустя две-три недели после того, как судно поднято из воды на берег. За счет явления обратного осмоса содержание влаги в корпусных конструкциях снижается и может достичь приемлемого уровня через шесть-восемь недель при условии нахождения в теплой и сухой среде. Часто этого не происходит. Подъем стеклопластиковых судов на берег в России производится, как правило, за одну-две недели до перехода среднесуточных температур воздуха через нулевую отметку в область отрицательных значений. При этом влага внутри корпусных конструкций кристаллизуется, одновременно увеличиваясь в объеме, образуя микроскопические осмотические линзы, в дальнейшем полости. Таким образом, последствиями намокания являются увеличение массы корпуса судна, снижение прочностных качеств корпусных конструкций из-за изменения структуры композита и ускоренное развитие расслоений при замерзании.

Продолжение следует

* В рамках данной статьи необходимо отличать осмос как явление водопоглощения стеклопластиков, всегда учитываемое при проектировании корпусов, от необязательно сопутствующих этому процессов разложения в них. О природе осмоса и связанных с этим явлением мифах мы планируем отдельную публикацию. – *Прим. ред.*