

Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации.

В соответствии с практикой, сложившейся в мировом судоходстве, одним из достоверных критериев оценки эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна является наблюдение за динамикой развития в нем различных эксплуатационных дефектов и износов. Развитие дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению ее прочностных качеств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. Для корпусов судов, изготовленных из традиционных материалов, величина дефекта или износа определяется, как правило, по изменению геометрических размеров поперечного сечения связей корпуса и связанных с ними механических характеристик (площади сечения, момента инерции сечения, момента сопротивления сечения). По достижении определенных размеров дефекта или износа, напряжения, действующие в конструкции в районе его расположения, превышают пределы прочности, установленные проектантом и изготовителем судна, в качестве предельно допустимых. Это может привести, как к разрушению конструкции при расчетных режимах движения, так и к непропорциональному увеличению зоны аварийных разрушений при нештатных эксплуатационных ситуациях.



**Рис. 1. Образец современного судна с корпусом из композиционных материалов**

В настоящее время большую часть мирового малотоннажного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов. Сегодня стеклопластиковое судостроение стало обособленной быстро развивающейся отраслью индустрии. Его прогресс обеспечивается, с одной стороны, успехами активно использующего композитные материалы аэрокосмического машиностроения, с другой - усилиями научно-производственных корпораций химической промышленности, разрабатывающих специализированные комплексы материалов и оборудования для производства и ремонта стеклопластиковых изделий. В частности, судов (см. рис. 1).

Как известно, с физической точки зрения армированный пластик представляет собой сложный материал, который обладает свойствами, отсутствующими у его компонентов в чистом виде. Армирующие волокна прочны, но гибки и проницаемы; связующие смолы - недостаточно прочны, хотя прекрасно держат форму и устойчивы к воздействию среды. Внедрение волокна в матрицу связующего дает эффект, равносильный созданию нового материала, прочность и жесткость которого в некоторых условиях будет сопоставима с металлами при вдвое - вчетверо более низкой плотности [1].

Максимальный срок гарантийных обязательств, устанавливаемых производителем, для корпусов судов из композитов, поставляемых на российский рынок, составляет 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 за судном, и предметом специальных процедур [16, 17].

В отличие от других материалов, применяемых для изготовления корпусов судов, слоистые композиты типа стеклопластика в процессе старения практически не изменяют своего внешнего вида и размеров, но в них возникают внутренние дефекты типа расслоение. В ряде случаев состарившийся расслоившийся стеклопластик с восстановленным декоративным покрытием внешне мало отличается от нового материала. Поэтому анализ изменения геометрических размеров сечения конструкции из композиционных материалов в процессе эксплуатации не имеет смысла. [3]

Корпус современного судна из композиционных материалов, эксплуатируемого, как правило, 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 необходимый набор качеств. При этом каждая из поверхностей корпуса и палубы имеет свой набор механических свойств. Эти свойства могут изменяться, как по толщине поверхности, так и по ее площади. Возникающие в подобной конструкции внутренние дефекты являются важным фактором, ухудшающим эксплуатационные качества корпусных конструкций и сокращающим срок службы корпусов судов из композиционных материалов. [16]

Понятие долговечности корпусных конструкций из композиционных материалов относится к стойкости композита к воздействиям механических нагрузок, воды, тепла и света. Эксплуатационные дефекты судовых корпусных конструкций из композиционных материалов можно классифицировать по причине возникновения следующим образом:

- дефекты, возникающие вследствие силовых воздействий на конструкцию;
- дефекты, возникающие вследствие воздействия на конструкцию воды;
- дефекты, возникающие вследствие температурных воздействий на конструкцию;
- дефекты, возникающие вследствие воздействия на конструкцию излучения;
- дефекты, случайного характера (аварийные) [16].

В настоящее время способ определения технического состояния корпуса судна из композиционных материалов в процессе эксплуатации надзорными органами базируется только на визуальном внешнем осмотре.

Существующий способ определения технического состояния корпуса судна из композиционных материалов в процессе эксплуатации надзорными органами базируется только на визуальном внешнем осмотре. При этом в соответствии с Правилами Российского Речного Регистра [14], техническое состояние пластмассового корпуса признается негодным в случаях расслоения обшивки и отслоения приформовок от обшивки и элементов набора, а также появления трещин по обшивке и набору.

Наблюдение за динамикой развития внутренних дефектов типа расслоение в корпусах судов из композиционных материалов в процессе их эксплуатации методами

неразрушающего контроля может позволить получить информацию об изменении технического состояния корпуса в процессе эксплуатации. Для выявления различных внутренних дефектов, в частности, дефектов типа расслоение в стеклопластиковых корпусных конструкциях судна могут быть применены методы неразрушающего контроля. Для неразрушающего контроля многослойных конструкций из композиционных материалов хорошие результаты дают акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля [3, 6, 10, 12].

Для проведения операций дефектоскопии была разработана "Временная методика исследования корпусов судов с динамическим способом поддержания (гλισсирующих) методами неразрушающего контроля с целью выявления дефектов типа расслоение", которая была утверждена Российским Речным Регистром [8, 13].

На базе Московского филиала Российского Речного Регистра в 2007-2009 годах производятся операции дефектоскопии корпусов судов, изготовленных из композиционных материалов, подлежащих очередному освидетельствованию по достижении пяти лет с момента постройки. Кроме того, дефектоскопии подвергались корпуса судов, бывших в эксплуатации, принимаемых на учет под техническое наблюдение Московского филиала Российского Речного Регистра, а также находящиеся на учете суда, корпуса которых получили аварийные повреждения в результате различных происшествий. Суда, прошедшие процедуру дефектоскопии корпуса в 2007 году, можно условно разделить на две группы:

- суда с динамическими принципами поддержания постройки США, стран Западной Европы и Азии;
- суда с динамическими принципами поддержания постройки СССР и стран СЭВ.

Суда обеих групп характеризуются собственными архитектурно – конструктивными особенностями в соответствии с принятыми в странах традициями проектирования и постройки. Суда первой группы имеют больше сходных архитектурно – компоновочных и конструктивных черт. Всего за два года процедуре дефектоскопии подверглось более 50 корпусов судов.

Последовательность операций при выявлении внутренних дефектов типа расслоение корпусов судов из композиционных материалов методами неразрушающего контроля устанавливается положениями «Временной методики». Основные технологические приемы и последовательность операций приводятся ниже.

Объект контроля (корпус судна из композиционных материалов) располагается на ровной площадке на кильблоке или на транспортировочном трейлере, в раскрепленном и неподвижном состоянии. При этом должен быть обеспечен доступ с любой стороны, (в том числе и со стороны днища), к любым поверхностям объекта контроля (исключая зоны контакта обшивки с кильблоками или ложементами трейлера). Подводная часть корпуса должна быть тщательно очищена от слоя загрязнений до поверхности декоративного слоя или до окрасочной поверхности, если корпус подвергался окраске. Стояночный чехол должен быть с объекта контроля демонтирован.

Внутренними дефектами судового корпуса, изготовленного из композиционных материалов, выявляемыми методами неразрушающего контроля, являются расслоения в следующих элементах конструкций:

- расслоения между слоями армирующего материала в виде заполненных газом пустот;
- расслоения между средними слоями и обшивками;
- расслоения между декоративным покрытием и изделием;
- расслоения в узлах соединений, как по плоскости контакта между соединяемыми элементами и соединительными элементами (накладками, приформовочными угольниками), так и в самих соединительных элементах.

Проявления осмоса фиксируются только в заключительной стадии – в виде расслоений.

Дефектоскопии подвергаются 100% площади поверхности корпуса судна в районе переменной ватерлинии, районах линий сопряжения днища, бортовой обшивки и транца. Кроме того, дефектоскопии подвергаются 100% площади мест примыкания к наружной обшивке фундаментов главных двигателей, продольного и поперечного набора, а также районов расположения и крепления движительно-рулевых комплексов, расположения дейдвудов и подруливающих устройств, и районов вырезов в надводном борте. Дефектоскопии подвергаются 100% площади поверхности мест осмотических изменений и зон аварийных контактов наружной обшивки на корпусе судна. Контроль выполняется при одностороннем доступе.

Дефектоскопии подвергаются 30% оставшейся площади поверхности подводной части корпуса и 10% площади поверхностей надводного борта, палуб, стенок и крыши надстройки. Контроль также выполняется при одностороннем доступе.

Остальные связи и поверхности судового корпуса из композитов подвергаются дефектоскопии по мере необходимости и возможности.

Все связи судового корпуса для целей дефектоскопии относятся к двум основным группам конструкций:

- наружная обшивка, настилы палуб, платформ и полотнища переборок (1 группа);
- продольный и поперечный набор (вертикальный киль, стрингеры, флоры, шпангоуты и бимсы) (2 группа).

При дефектоскопии корпусов судов, изготовленных из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, в первую очередь, неразрушающему контролю должны подвергаться связи первой группы (наружная обшивка, настилы палуб). Остальные связи корпуса подвергаются дефектоскопии по мере возможности, в случае, если доступ к ним не требует трудоемкого демонтажа элементов зашивки и обстройки.

В качестве основных методов неразрушающего контроля корпусов судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, применяемых для обнаружения внутренних дефектов типа расслоение, применяются:

- акустический импедансный метод с использованием отдельно - совмещенного преобразователя;
- акустический метод свободных колебаний.

В качестве прибора, реализующего оба эти метода неразрушающего контроля внутренних дефектов типа расслоение многослойных корпусных конструкций из конструкционного стеклопластика, используется портативный дефектоскоп ДАМИ-С в модификации с акустическим сканером с отдельно – совмещенным преобразователем РС-1 и преобразователем свободных колебаний ИПУ-1. Наиболее эффективные результаты неразрушающего контроля судовых конструкций из композиционных материалов достигаются сочетанием в работе обоих преобразователей. Наличие акустического сканера позволяет весьма точно определять местоположения координат дефектов. Кроме того, акустический сканер позволяет получать изображения дефектов в графической форме, производить измерение их размеров и площади.

Для неразрушающего контроля судовых корпусных конструкций из композитов используется режим безэталонных настроек прибора. Выбор типа преобразователя, работающего с прибором ДАМИ-С, осуществляется для каждого конкретного участка поверхности контроля, реализуемого метода и вида операции контроля. Преобразователь свободных колебаний ИПУ-1 используется для контроля поверхностей большой площади в нижнем и наклонном положениях с целью выявления зон нахождения дефектов, а также для выявления глубоко залегающих дефектов (до 30 мм). Для обнаружения дефектов, расположенных на глубине более 3 мм, и измерения их площади используются точечный и пороговый режимы работы дефектоскопа с отдельно-совмещенным преобразователем.

Как правило, дефектоскопия производится прибором, находящимся в режиме питания от аккумуляторов. Проведение дефектоскопии прибором, подключенным к сети 220В,

может выполняться в исключительных случаях, обусловленных производственной необходимостью.

Корпус судна из композиционных материалов характеризуется многообразием сочетаний конструктивных элементов, схем армирования и расположений подкреплений. При контроле судовых корпусных конструкций из композитов односторонний доступ осуществляется со стороны декоративного слоя. В отдельных случаях, при возможности, контроль осуществляется и с внутренней стороны конструкции.

При контроле конструкций с внутренними элементами, обладающими газонаполненной структурой (например, пенопластами), контролю должны подвергаться слои, расположенные до газонаполненной структуры.

При контроле изделий перпендикулярность осей вибраторов к поверхности обеспечивается конструкцией преобразователя. При заметной кривизне поверхности при сканировании преобразователи следует ориентировать так, чтобы отклонение оси преобразователя от нормали к поверхности изделия в точке контроля не превышало 3 - 5 градусов.

Шаг дефектоскопии конструкций не должен превышать 500 мм, шаг дефектоскопии в узлах соединений - не более 250 мм.

На всех обследованных судах были зафиксированы внутренние дефекты типа расслоение в количествах, превышающих несколько сотен, в различных местах корпуса. Все они имели эксплуатационную природу происхождения. При этом по сообщениям представителей судовладельцев, общее количество часов эксплуатации судов в среднем составляло не более 200 часов в навигацию, или не более одной тысячи часов за пять лет, в связи с чем, можно предположить достаточно низкий ресурс работы обследованных судовых корпусных конструкций из композитов. [16, 17]

В соответствии с действующими Правилами Российского Речного Регистра все эти суда должны были быть признаны непригодными к эксплуатации.

Учитывая изложенное выше, необходимо признать, что требования Правил Российского Речного Регистра в части оценки технического состояния корпуса судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, (в Правилах они называются пластмассовыми судами), устарели и необходим способ оценки их технического состояния, учитывающий существующие реалии и базирующийся на других критериях.

Разработанный способ определения технического состояния корпуса судна из композиционных материалов в процессе эксплуатации базируется на выявлении и измерении параметров внутренних дефектов корпусных конструкций методами неразрушающего контроля и сопоставления полученных результатов с критериями эксплуатационной прочности и долговечности.

Под критериями эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, понимается оценка изменений его прочностных свойств, с учетом возникших в процессе эксплуатации внутренних дефектов типа расслоение. Оценка изменения прочностных свойств представляет собой сопоставление прочностных качеств конструкции, рассчитанных в соответствии с действующими нормами проектирования для нового корпуса, и прочностных качеств той же конструкции, рассчитанных с учетом наличия в ней дефектов типа расслоение, возникших в процессе эксплуатации, имеющих определенные геометрические параметры.

В качестве двух основных критериев рассматривается изменение прочностных характеристик в районе развивающегося дефекта типа расслоения, приводящее к увеличению расчетных напряжений, и достижение дефектом размеров, при которых может возникнуть его уверенный рост. [11].

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 срока

эксплуатации. Они оцениваются также 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.

Предельный размер дефекта определяется условиями, обеспечивающими его устойчивый рост при действующих в конструкции напряжениях.

В качестве опасных напряжений принимаются пределы прочности стеклопластика 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 композиционных материалов 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.

Для выполнения расчета предельно допустимой площади дефекта элементы корпусных конструкций рассматриваются в качестве расчетных моделей, для которых имеются подтвержденные практикой способы расчетов. Расчетные модели разработаны на основании существующих методов и с учетом особенностей конструктивных узлов, схем армирования и примененных технологических процессов формования корпусных конструкций. В качестве основы для расчетных моделей использовалась конструкция из композитов корпуса катера по технической документации ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс», а также образцы, выпиленные из корпусов существующих судов (см. рис. 2 – 4).

## Образец №4

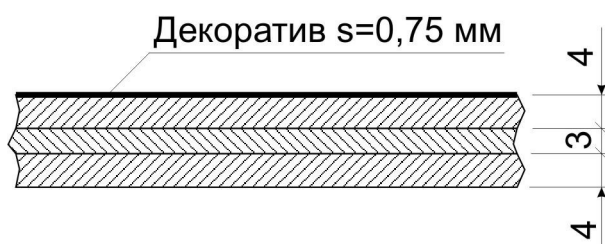


Рис. 2. Сечение многослойной обшивки борта судна из композитов

## Образец №5



Рис. 3. Сечение обшивки палубы с подкреплением из вспененного заполнителя

## Образец №7

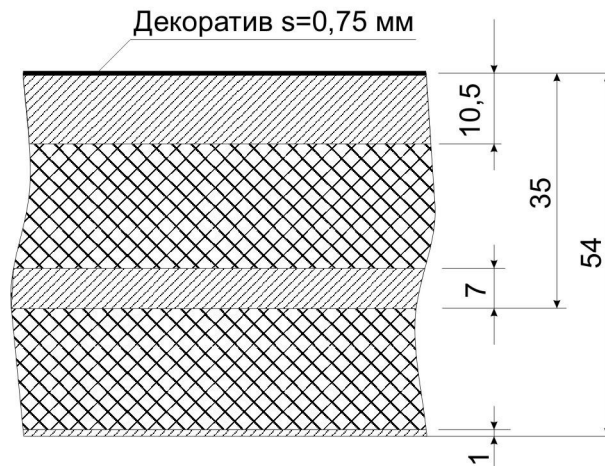


Рис. 4. Сечение обшивки транца с жестким на растяжение средним слоем

Поверхности обшивки корпуса в расчетных моделях рассматриваются, как пластины, жестко заделанные на опорном контуре, (линия киля, линии слома борта, линии сочленения борта и палубы, линия примыкания транца), а также свободно опертые на открытых зигах, (реданы, декоративные зиги бортов и т. п.) Учитывается анизотропия материала. [9] Слой конструкции, полученный методом напыления, рассматривается, как изотропный. Все корпусные конструкции сведены к трем основным расчетным моделям:

- абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким наполнителем;
- абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с жестким на растяжение средним слоем.

При обработке результатов дефектоскопии установлено, что формирование макроскопических дефектов происходит из микроповреждений. В соответствии с [1, 2] оно происходит путем накопления микроповреждений на фронте формирования макроскопического дефекта: трещины или расслоения (см. рис. 5).

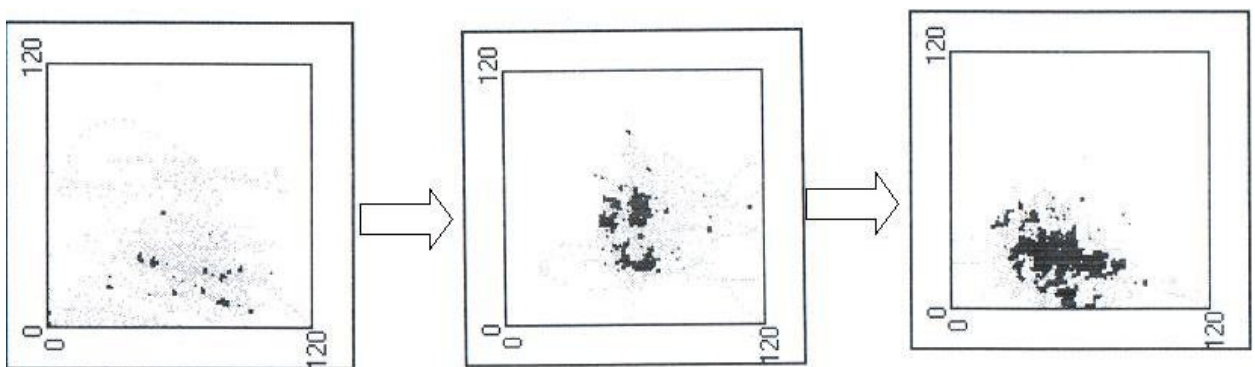


Рис. 5. Развитие дефекта из микроповреждений (изображения получены методами неразрушающего контроля)

Скорость накопления микроповреждений зависит от локальных напряжений. Характер роста макроскопического дефекта зависит от распределения микроповреждений в окрестности его фронта. Условно существуют две типичные ситуации:

- макроскопический дефект растет непрерывно;

- макроскопический дефект растет скачкообразно.

Под непрерывным ростом понимается такой рост макроскопического дефекта, когда размеры скачков его роста малы по сравнению с технически значимыми размерами. Рост макроскопических дефектов в слоистых композитах при длительно действующих или циклических нагрузках происходит устойчиво, если параметры отслоения соответствуют определенным условиям (соответствуют критерию Гриффитса или Ирвина). Одним из условий является достижение действующими в месте развития дефекта напряжениями определенных величин, считающихся критическими.

Согласно модели Леонова - Панасюка – Дагдейла у фронта дефекта существует тонкая концевая зона, где сосредоточены все неупругие эффекты. В пределах концевой зоны критическое напряжение считается постоянным. Это напряжение аналогично пределу текучести материала.

После некоторой относительно непродолжительной инкубационной стадии накопления микроповреждений на фронте формирования расслоения происходит его скачкообразный рост за счет объединения микроповреждений на фронте до перехода макроскопического дефекта в мало поврежденную область матричной прослойки. Продолжающееся воздействие нагрузки на композит способствует дальнейшему накоплению микроповреждений на фронте формирования макроскопического дефекта и последующим циклам его скачкообразного роста.

Ослабление или исчезновение связей между соседними слоями в зоне существования дефекта приводит к существенному изменению механических характеристик элемента конструкции в этом месте в сторону их ослабления. По данным экспериментальных исследований [2] это ослабление может достигать 1,5...4,0 раз. Снижение механических характеристик конструкции, в свою очередь, приводит к росту действующих в зоне существования дефекта напряжений. Рост напряжений при перераспределении выше определенных величин порождает дальнейшее развитие дефекта. Со временем размеры дефекта достигают величин, существенно влияющих на прочность конструкции. Таким образом, по достижении определенных размеров макроскопический дефект начинает весьма заметным образом влиять на перераспределение в конструкции напряжений, вызываемых внешними нагрузками, в своей окрестности.

Величина напряжения, при которой может начаться рост дефекта, называется критической. Согласно энергетической концепции Гриффитса, дефект не растет, если значение потенциальной энергии системы, высвобождаемой при продвижении роста дефекта, меньше работы разрушения. Формула критического напряжения (по Гриффитсу) имеет вид:

$$\sigma_c = \left[ \frac{\gamma E}{\pi L (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

где,  $\sigma_c$  – критическое напряжение;

$\gamma$  - удельная работа разрушения;

$E$  - модуль упругости;

$\nu$  - коэффициент Пуассона;

$L$  - размер дефекта.



Величина удельной работы разрушения  $\gamma$  может быть определена по формуле с использованием критерия Ирвина:

$$\gamma = \frac{K_{1c}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (2)$$

Где,  $E$  – модуль упругости.

$\gamma$  – удельная работа разрушения;

$K_{1c}$  – критическое значение коэффициента интенсивности Напряжений.

Формула критического напряжения с использованием критерия Ирвина примет вид:

$$\sigma_c = K_{1c} \left[ \frac{1}{\pi L} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Учитывая сложные конфигурации дефектов, с определенной степенью достоверности, размер дефекта может быть представлен, как:

$$L = (S_D)^{1/2} \quad (4)$$

где,  $S_D$  – площадь дефекта;

Тогда формула расчета критического напряжения с использованием критерия Гриффитса примет вид:

$$\sigma_c = \left[ \frac{\gamma E_{np}}{\pi (S_D)^{1/2} (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Формула расчета критического напряжения с использованием критерия Ирвина примет вид:

$$\sigma_c = K_{1c} \left[ \frac{1}{\pi (S_D)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Из формулы (9) видно, что величина критического напряжения обратно пропорциональна площади дефекта. Экспериментально показано [6], что снижение прочности композита происходит только в том случае, если имеет место развитие расслоения, т.е. если действующее напряжение превосходит критическое.

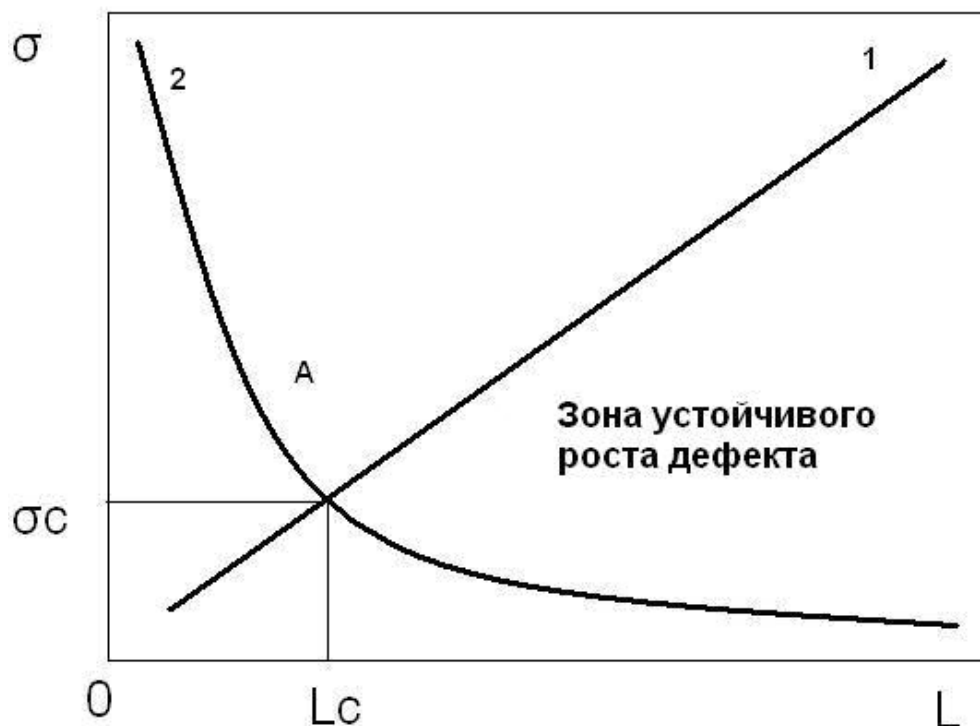


Рис. 6. Напряжения разрушения композита.

В графическом виде качественный характер этих зависимостей представлен на рис. 6. Под номером 1 условно изображен график изменения напряжений, вызванных действием внешней нагрузки. Под номером 2 изображен график зависимости между критическими напряжениями и размерами дефекта (по формуле Гриффитса). Точка пересечения графиков позволяет определить размер дефекта, соответствующий критическому напряжению при заданной внешней нагрузке. Зона, расположенная правее точки  $A(\sigma_c; L_c)$  ограниченная графиками 1 и 2, является зоной устойчивого роста дефектов, т.е. зоной разрушения.

Следовательно, с определенной степенью достоверности, может быть определена площадь дефекта, соответствующая критическому напряжению, и, наоборот, по величине критического напряжения для конструкции может быть определена максимально допустимая площадь существующего дефекта. По результатам проведенных исследований [2] максимальное раскрытие расслоений не превышает 0,3 мм. По сравнению с толщиной обшивки стеклопластикового корпуса, составляющей 10 – 50 мм, этой величиной можно пренебречь при выполнении расчетов изменения жесткости расслоившейся конструкции.

Согласно формуле (4) размер дефекта, соответствующий критическому напряжению, может быть представлен, как:

$$L_c = (S_c)^{1/2} \quad (7)$$

где,  $L_c$  – размер дефекта, соответствующий критическому напряжению;

$S_c$  - площадь дефекта соответствующая критическому напряжению.

Для  $i$ -го элемента судовой конструкции в виде абсолютно жесткой пластины напряжения определяются как:

$$\sigma^i = \frac{M_{изг}^i E_{np} (z - z_0)}{D^i} \quad (8)$$

Где,  $M_{изг}^i$  - изгибающий момент в центре пластины или в опорном сечении;

$E_{np}$  – приведенный модуль упругости;

$z$  – половина расстояния между срединными поверхностями слоев пластины;

$z_0$  - смещение нейтральной поверхности от срединной линии сечения пластины;

$D^i$  – цилиндрическая жесткость пластины на изгиб.

Определение изгибающих моментов, цилиндрической жесткости пластины на изгиб, приведенные модули упругости и коэффициенты Пуассона определяются в соответствии с общеизвестными принципами строительной механики корабля, описанными в специализированной литературе [4, 5, 7, 9].

Степень влияния дефекта типа расслоение на изменение механических характеристик элемента корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, при изгибе оценивается ростом напряжений, вызванных действием изгибающего момента, в зоне расслоения по отношению к целому участку за счет снижения цилиндрической жесткости на изгиб [7].

Соответственно, напряжение от изгиба в зоне расслоения абсолютно жесткой пластины может быть определено как:

$$\sigma_{рас}^i = \frac{M_{изг}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D_{рас}^i} \quad (9)$$

Условие обеспечения прочности для целой конструкции может быть записано, как:

$$\sigma^i \leq \sigma_0 \quad (10)$$

Где,  $\sigma^i$ , – действующие в целой конструкции напряжения;

$\sigma_0$ , – предел прочности.

Тогда условие обеспечения прочности конструкции в зоне расслоения может быть записано, как:

$$\sigma_{рас}^i \leq \sigma_0 \quad (11)$$

Где,  $\sigma_{рас}^i$ , – действующие в зоне расслоения конструкции напряжения.

В случае невыполнения условия (10) можно говорить о нарушении прочностных характеристик конструкции в зоне дефекта.

Для  $i$ -го элемента судовой конструкции, изготовленной из композиционных материалов, может быть определена предельно допустимая площадь отдельного дефекта, соответствующая началу его роста в условиях заданной нагрузки.

Условие нераспространения дефекта может быть записано, как:

$$\sigma_{рас}^i \leq \sigma_c \quad (12)$$

Или в развернутом виде с учетом критерия Гриффитса:

$$\sigma_{рас}^i = \frac{M_{изг}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D_{рас}^i} \leq \sigma_c = \left[ \frac{\gamma E_{np}}{\pi (S_D)^{1/2} (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Или в развернутом виде с учетом критерия Ирвина:

$$\sigma_{рас}^i = \frac{M_{изг}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D_{рас}^i} \leq \sigma_c = K_{1c} \left[ \frac{1}{\pi (S_D)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (14)$$

В зависимости от того, какой из двух величин,  $\gamma$  или  $K_{1c}$ , определяемых экспериментальным путем, обладает расчетчик. В случае невыполнения условия (13, 14) можно говорить о достижении дефектом размеров, при которых может возникнуть его уверенный рост.

Описанный выше способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, с использованием методов неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов, измерением их площади и сравнением ее величины с предельно допустимым значением запатентован.

### Библиографический список

1. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы. – Новосибирск: НГТУ, - 2002 – 378 с.
2. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: Справочник - М., Машиностроение, 1990. - 512 с.
3. Гершберг М. В., Илюшин С. В., Смирнов В. И. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. Л., «Судостроение», 1971. 199 с.
4. Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н., Трянин И.И. Прочность судов внутреннего плавания. Справочник. М.: Транспорт, 1978. 580 с.
5. Киреев В.А., Толстобров Е.П. Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых панелей при поперечном изгибе. Труды ЦАГИ вып. 1872. М., 1977, с. 3 – 17 (ЦАГИ)
6. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций из композитных материалов. - М.: Машиностроение, 1991.
7. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М: Машиностроение, - 2003 – 447 с.
8. Определение дефектов корпуса судна из композиционных материалов методами неразрушающего контроля. Научно - технический отчет Московского филиала Российского Речного Регистра, М, 2006,- 65 с.
9. ОСТ5.1068-75 «Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности». ЦНИИТС, Л., 1975
10. ОСТ5.9102-87 "Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля", ЦНИИТС, Л., 1987

11. Полилов А.Н. и др. Влияние расслоений на прочность углепластиков при сжатии. - В сб. Авиационные материалы. М., 1986, с. 5 – 11 (ВИАМ)
12. Потапов А.И. Пеккер Ф.П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов, Л., 1977, 192 с.
13. Российский Речной Регистр. Временная методика исследования корпусов судов с динамическим способом поддержания (гλισсирующих) методами неразрушающего контроля с целью выявления дефектов типа расслоение, М, 2007, - 8 с.
14. Российский Речной Регистр. Правила, Том 1. М. «По Волге» 2002 – 270 с.
15. Российский Речной Регистр. Правила, Том 2. М «По Волге» 2002 – 400 с.
16. Францев М.Э. Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов, Катера и яхты № 2(212) , стр. 90-93, № 3(213), стр. 102-105, 2008
17. Францев М.Э. Причины возникновения эксплуатационных дефектов корпусов судов из композиционных материалов, Доклад на Конференции Российского Речного Регистра в рамках Второй международной специализированной выставки «Московское Боут Шоу - 2009», 09.02.2009 г.