



контролировать работу электромагнитных форсунок и герметичность системы питания.

Результатами этих исследований должно быть последовательное решение задач:

1) определение наиболее чувствительных диагностических параметров для распознавания распространенных дефектов электромагнитных форсунок;

2) решение технических задач по достоверному и оперативному измерению диагностических параметров;

3) разработка алгоритмов диагностирования и их апробирование в стендовых и эксплуатационных условиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грехов Л.В. Топливная аппаратура с электронным управлением дизелей и двигателей с непосредственным впрыском бензина: учеб.-практ. пособие. М.: Легион – Автодата, 2001. 176 с.
2. Ерохов В.И. Системы впрыска топлива легковых автомобилей. М.: Транспорт, 2002. 174 с.
3. Данилов А.М. Применение присадок в топливах. М.: Мир, 2005. 288 с.
4. Бююр В.С., Куликов А.В., Христов П.Н. и др. Системы распределенного впрыска топлива автомобилей ВАЗ – устройство и диагностика. Тольятти: ИТЦ АВТО. 2003. 127 с.

УДК 629.12.001

М.Э. Францев (АО "Нептунсудомонтаж", г. Долгопрудный, Московская обл.)  
E-mail: gepard629@yandex.ru

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

*Развитие малотоннажного судостроения из композитов нуждается в современном объективном способе оценки технического состояния корпусов таких судов. Существующие способы оценки необъективны, а требования надзорных органов неоправданно жестки. Рассматривается способ оценки технического состояния корпуса из композитов, базирующийся на выявлении в них эксплуатационных внутренних дефектов типа расслоения методами неразрушающего контроля, определении их размеров и соотношении с предельно допустимыми значениями, рассчитанными из условия сохранения целостности конструкции. Данный метод запатентован.*

*The subject of this article is about marine technology especially technical exploitation of boats. The development of high-speed shipbuilding for the time being in need of modern objective mode of the estimation of technical condition of the fiberglass boat hull. The modes which used until recently are not objective. The rules of the state agency about that are unnecessary hard. This article is telling about the mode of the estimate techniques condition fiberglass boat hull. This mode is based on a search of inside exploitation defects type lamination in the fiberglass boat hulls with impedance and impact testing methods. After that defects measured and compared with utmost dimensions. This dimensions of defects calculated on condition that boat hull is indestructible. This mode has been patented.*

**Ключевые слова:** малотоннажное судостроение из композитов, техническая эксплуатация судов, способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов, методы неразрушающего контроля, внутренние дефекты типа расслоение, целостность конструкции.

**Key words:** High-speed shipbuilding, Fiberglass boat hull, Mode of the estimation of technical condition, Inside exploitation defects type lamination, Impedance and impact testing methods, Boat hull is indestructible.

В соответствии с практикой, сложившейся в мировом судостроении, одним из достоверных критериев оценки эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна

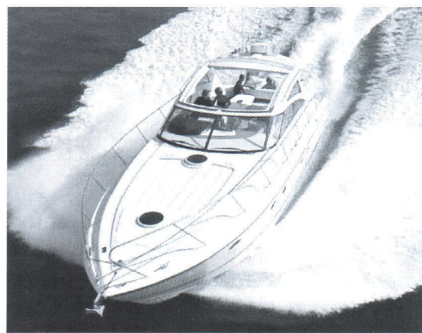
является наблюдение за динамикой развития в нем различных эксплуатационных дефектов и износов. Развитие дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению как

прочностных ее качеств, так 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 обусловленных ими 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.

В настоящее время большую часть мирового малотоннажного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов. Сегодня стеклопластиковое судостроение стало самостоятельной быстро развивающейся отраслью индустрии. Его прогресс обеспечивается, с одной стороны, успехами активно используемых 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 (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 волокон 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 ком-



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

позитов, 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 расслоения. 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 воды на конструкцию;
- дефекты, возникающие вследствие температурных воздействий на конструкцию;
- дефекты, возникающие вследствие воздействия излучения на конструкцию;
- 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.

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 расслоения 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 расслоения, 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 (глиссирующих) 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 гг. проводится дефектоскопия 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 г., 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 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 расслоения 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 декоративного слоя или окрасочной поверхности, если корпус подвергался окраске. Стояночный чехол должен быть с объекта контроля демонтирован.

Для судового корпуса, изготовленного из композиционных материалов внутренними дефектами, 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, 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:

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

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 контролируются по мере возможности, 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 расслоения, применяются:

- акустический импедансный метод с использованием раздельно-совмещенного преобразователя;



– акустический метод свободных колебаний.

В качестве прибора, реализующего оба эти метода НК, используется портативный дефектоскоп ДАМИ-С в модификации с акустическим сканером с раздельно-совместным 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. Акустический сканер позволяет весьма точно определять координаты дефектов, получать их изображения в графической форме и измерять их размеры.

Для НК судовых корпусных конструкций из композитов используется режим безэталонных настроек прибора. Тип преобразователя, работающего с прибором ДАМИ-С, выбирается 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 в целях выявления зон 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 раздельно-совместным преобразователем.

Как правило, пользуются прибором с питанием от аккумуляторов. Работа прибором, подключенным к сети 220 В, выполняется в исключительных случаях, обусловленных производственной необходимостью.

Корпус судна из композиционных материалов характеризуется многообразием сочетаний конструктивных элементов, схем армирования и расположения подкреплений. При контроле судовых корпусных конструкций из композитов возможен односторонний доступ 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  $3...5^\circ$ .

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

На всех обследованных судах в различных местах корпуса были зафиксированы внутренние дефекты типа расслоения в количествах, превышающих несколько сотен. Все они имели эксплуатационную природу происхождения. При этом, по сообщениям представителей судовладельцев, эксплуатация судов в среднем составляла не более 200 ч в навигацию, или не более 1000 ч за 5 лет, в связи с чем можно предположить достаточно низкий ресурс работы обследо-

ванных судовых корпусных конструкций из композитов [16, 17].

В соответствии с действующими Правилами Российского Речного Регистра все эти суда следовало признать непригодными к эксплуатации.

Практика показывает, 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 основан на выявлении и измерении параметров внутренних дефектов корпусных конструкций методами НК и соотнесения 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 расслоения. 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 расслоения, возникших в процессе эксплуатации, имеющих определенные геометрические параметры.

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

При определении предельно допустимых величин геометрических параметров внутренних дефектов типа расслоения в конструкции неременным условием является сохранение ее целостности, или практической неизменяемости формы конструкции, в течение всего срока эксплуатации, а также прочности конструкции, устойчивости, жесткости и долговечности (ресурса).

Предельной величиной утраты прочностных свойств конструкции считается достижение геометрических параметров дефектов типа расслоения таких величин, при которых уровень действующих в конструкции напряжений превышает предельно допустимый уровень, установленный нормами проектирования.

Предельный размер дефекта определяется условиями, вызывающими 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.

Установление значений опасных напряжений для судовых конструкций из композиционных материалов производится дифференцированно, 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 расчета предельно допустимой площади дефекта элементов корпусных конструкций рассматриваются расчетные модели, для которых имеются подтвержденные практикой способы расчетов. Расчетные модели разработаны на основе существующих методов расчета 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 (рис. 2–4).

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 зигзах (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.

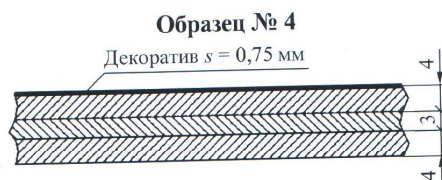


Рис. 2. Сечение многослойной обшивки борта судна из композитов



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

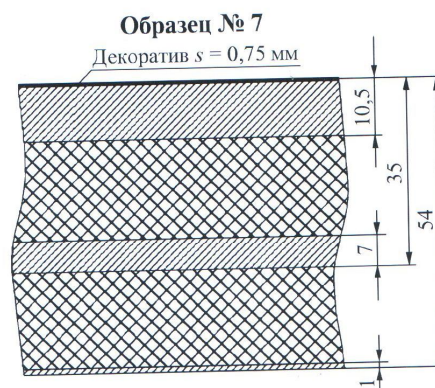


Рис. 4. Сечение обшивки транца с жестким на растяжение средним слоем

При обработке результатов дефектоскопии установлено, что макроскопические дефекты формируются из микроповреждений. В соответствии с [1, 2] происходит накопление микроповреждений на фронте образования макроскопического дефекта: трещины или расслоения (рис. 5).

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 (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 к последующим циклам его скачкообразного роста.

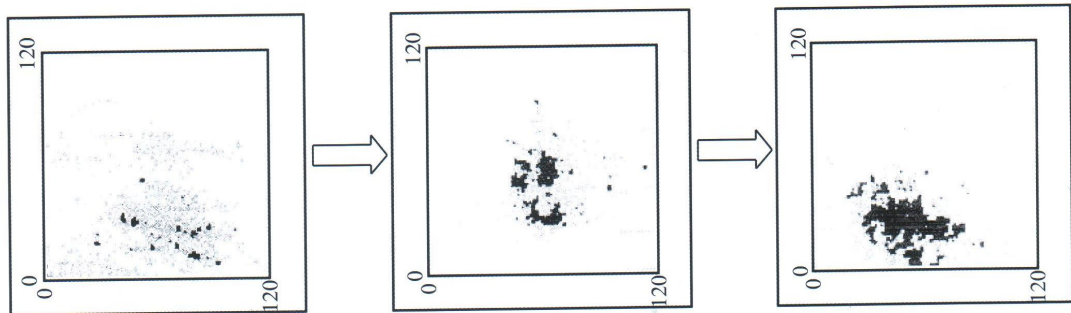


Рис. 5. Развитие дефекта из микрповреждений (изображения получены методами НК)

Ослабление или исчезновение связей между соседними слоями в зоне дефекта существенно изменяет механические характеристики элемента конструкции в этом месте в сторону их ослабления. По данным экспериментальных исследований [2], это ослабление может достигать 1,5–4 раза. Снижение механических характеристик конструкции, в свою очередь, приводит к росту действующих в зоне существования дефекта напряжений. Рост напряжений при перераспределении 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 заметно 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:

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

где  $K_{Ic}$  – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Формула критического напряжения с использованием критерия Ирвина примет вид

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

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

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

где  $E_{np}$  – приведенный метод упругости.

Формула расчета критического напряжения с использованием критерия Ирвина представляет собой

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

Из формулы (6) 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.

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 линиями 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 опре-

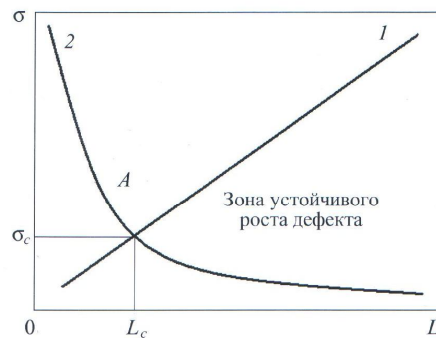


Рис. 6. Напряжения разрушения композита

делена максимально допустимая площадь существующего дефекта. По результатам 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 абсолютной жесткой пластины напряжения определяются так:

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

где  $M_{изг}^i$  – изгибающий момент в центре пластины или в опорном сечении;  $z$  – 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, приведенных модулей упругости и коэффициентов Пуассона выполняется в соответствии с общеизвестными принципами строительной механики корабля, описанными в специализированной литературе [4, 5, 7, 9].

Степень влияния дефекта типа расслоения 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

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

где  $\sigma_{рас}^i$  – цилиндрическая жесткость расслоившейся пластины.

Условие обеспечения прочности для целой конструкции может быть записано в виде

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

где  $\sigma_i$  – действующие в целой конструкции напряжения;  $\sigma_0$  – предел прочности.

Тогда условие обеспечения прочности конструкции в зоне расслоения может быть представлено

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

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 выражено

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

или в развернутом виде с учетом критерия Гриффитса

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

или в развернутом виде с учетом критерия Ирвина

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

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

Описанный способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, с использованием методов НК для обнаружения внутренних дефектов, изменением 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., Матгес 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 // Тр. ЦАГИ. Вып. 1872. М., 1977. С. 3–17.
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: науч.-техн. отчет Московского филиала Российского Речного Регистра. М., 2006. 65 с.
9. **ОСТ 5.1068–75.** Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности. Л.: ЦНИИТС, 1975.
10. **ОСТ 5.9102–87.** Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля. Л.: ЦНИИТС, 1987.
11. **Полилов А.Н. и др.** Влияние расслоений на прочность углепластиков при сжатии // Авиационные материалы. М., 1986. С. 5–11.
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. Т. 1. М.: По Волге, 2002. 270 с.
15. **Российский Речной Регистр.** Правила. Т. 2. М.: По Волге, 2002. 400 с.
16. **Францев М.Э.** Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов // Катера и яхты. 2008. № 2. С. 90–93; № 3. С. 102–105.
17. **Францев М.Э.** Причины возникновения эксплуатационных дефектов корпусов судов из композиционных материалов: докл. на конференции Российского Речного Регистра в рамках 2-й Междунар. спец. выст. "Московское Боут Шоу - 2009". М., 2009.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4  
Учредители: РОНКТД; ООО "Издательский дом "Спектр" E-mail: [td@mashin.ru](mailto:td@mashin.ru); [kdpost@rambler.ru](mailto:kdpost@rambler.ru)  
Телефоны редакции журнала: (499) 268-36-54; (495) 514-76-50. [Http://www.Mashin.ru](http://www.Mashin.ru)  
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры: *Сажина Л.И., Сотошкина Л.Е.*  
Сдано в набор 08.09.09 г. Подписано в печать 26.10.09 г.  
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 9,07. Заказ 952. Свободная цена.  
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".  
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.