

Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение

М. Э. ФРАНЦЕВ, канд. техн. наук

Инжиниринговая компания «АОЗТ «Нептун-Судомонтаж», г. Долгопрудный,
Московская область, Россия

Рассмотрен способ определения степени потери прочности и оценки возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала (КМ) в зоне развития дефекта типа расслоение эксплуатационной природы. Изложены теоретические основы способа. В качестве примера приведены результаты расчета судовой корпусной конструкции, прошедшей техническую эксплуатацию. Применение способа позволяет выполнить необходимые расчеты и дать рекомендации по нескольким десяткам дефектов в течение короткого времени, что делает способ доступным для специалистов, занимающихся вопросами определения технического состояния корпуса судна из КМ.

Ключевые слова: корпус судна, композиционный материал, внутренний дефект типа расслоение, степень потери прочности.

В соответствии с практикой, сложившейся в мировом судоходстве, одним из достоверных критериев оценки технического состояния корпуса судна является выявление и учет имеющихся в нем различных эксплуатационных дефектов и износов. Развитие эксплуатационных дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению ее прочностных свойств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. По достижении определенных размеров дефекта или износа напряжения, действующие в конструкции в районе его расположения, превышают пределы прочности, установленные разработчиком 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.

Такие корпуса получают оценку ограниченной годности, а в дальнейшем – непригодности к эксплуатации. В отличие от других материалов, применяемых для изготовления корпусов судов, слоистые КМ типа стеклопластика в процессе старения практически не изменяют своего внешнего вида и размеров, но в них возникают внутренние дефекты типа расслоение.

Классификационным обществам, а также другим субъектам судоходства, осуществляющим техническое наблюдение и надзор за судами, изготовленными из КМ, в процессе их эксплуатации необходима достоверная оценка технического состояния корпусов судов. Например, в соответствии с Правилами Российского Речного Регистра (РРР), 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. В то же время при дефектоскопии корпуса судна из КМ в возрасте от пяти лет методами неразрушающего контроля обнаруживаются в среднем до 200—300 участков корпуса, содержащих внутренние дефекты типа расслоение различных размеров (рис. 1) [1]. Однако оценка изменения прочности и жесткости всего пластмассового корпуса судна или же его отдельных элементов при возникновении в них вышеупомянутых дефектов Правилами РРР не предусмотрена. Поэтому для определения прочности и долговечности корпуса судна из КМ, находящегося в эксплуатации, необходимо провести интерпретацию результатов дефектоскопии.

В отечественной науке изучены различные аспекты механики КМ, в том числе, содержащих различные внутренние дефекты в виде трещин и расслоений. Работы таких ученых, как В. В. Болотин, Л. А. Бохоева, Г. П. Черепанов и других, посвящены анализу, нормированию и оценке эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из КМ, способу оценки техниче-

Францев Михаил Эрнестович, директор.
E-mail: gepard629@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 октября 2015 г.

© Францев М. Э., 2016

ского состояния корпусов в процессе эксплуатации, описанию эксплуатационного поведения отдельных элементов корпуса глиссирующего судна из КМ в условиях воздействия гидродинамических нагрузок. Известны работы, содержащие методики расчетов по оценке механических свойств КМ в районе дефекта типа расслоение, выполненных различными численными методами, в первую очередь, с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Однако применение расчетов с помощью МКЭ для оценки прочности элементов корпуса судна из КМ, находящегося в эксплуатации и имеющего большое количество расслоившихся участков, технически и экономически весьма затратно. Поэтому для оценки возможности разрушения судовой корпусной конструкции из КМ зоне развития внутреннего дефекта типа расслоение эксплуатационной природы необходим более простой и доступный способ определения степени снижения прочностных свойств.

Развитие дефекта типа расслоение, ведущее к разрушению элемента конструкции из КМ, подробно рассмотрено Г. П. Черепановым (рис. 2) [2]. Им же описаны механизмы его развития.

Согласно выполненным исследованиям при растяжении слоистого КМ в области его разрушения сначала происходит продольное растрескивание, начинающееся с матрицы, которое инициирует разрушение волокон. Продольная трещина проходит не строго вдоль волокон, но 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. Как следствие, происходит лавинообразное рассыпание материала на мелкие фрагменты.

Считается, что отслоение развивается в случае, если 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. При рассмотрении задачи растрескивания при растяжении волокнистого КМ вблизи начального несовершенства в виде отверстия критическое напряжение σ_c рассчитывается по критерию Гриффитса, согласно которому предельным размером дефекта является диаметр отверстия [3].

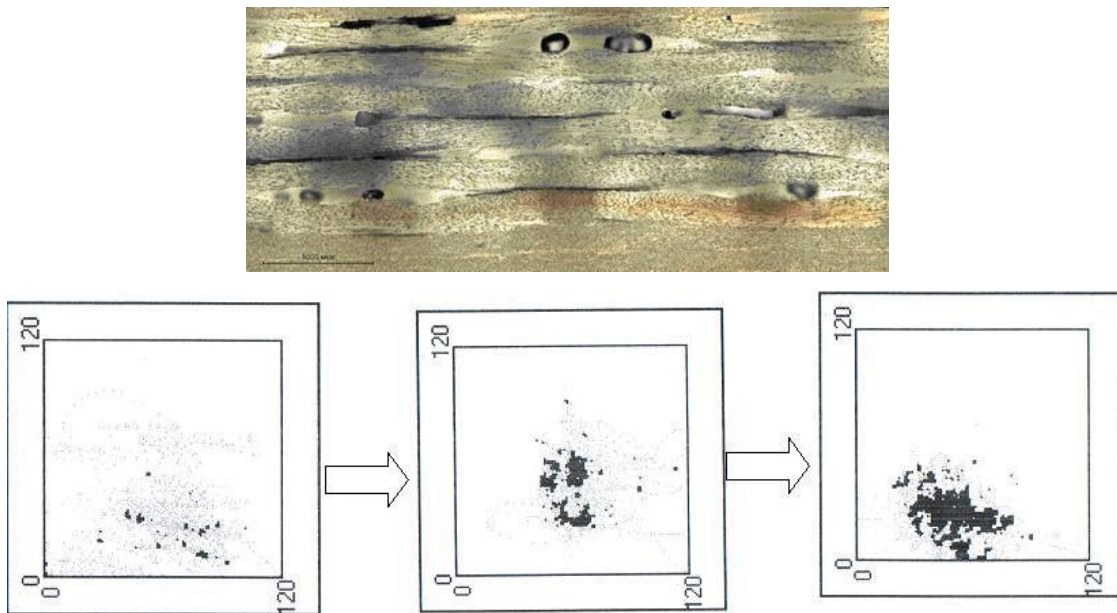


Рис. 1. Макрошлиф с внутренними дефектами и их развитие из микроповреждений (изображения получены микроскопией и методом неразрушающего контроля)

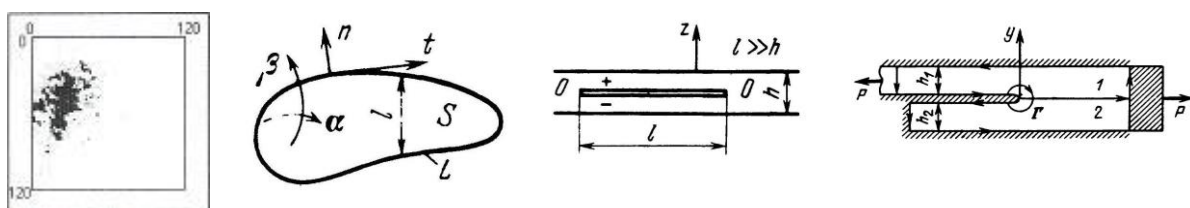


Рис. 2. Базовые модели дефекта типа расслоение по Г. П. Черепанову

Предлагаемый автором расчет прочности элемента судовой корпусной конструкции из КМ, содержащей внутренние дефекты типа расслоение, при определении ее технического состояния включает следующие операции:

- определение внешних нагрузок, действующих на элемент судовой корпусной конструкции из КМ, содержащий внутренние дефекты типа расслоение, в режиме нормальной эксплуатации согласно ОСТ5.1068-75 "Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности";

- определение расчетных схем элемента судовой корпусной конструкции из КМ в месте выявленного дефекта в случае ее целостного состояния и в случае расслоившегося элемента;

- введение понижающих коэффициентов в соответствии с Правилами РРР с целью определения расчетных параметров (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), позволяющих учесть изменение характеристик долговечности КМ для данного элемента корпусной конструкции;

- расчет прочности элемента конструкции, в котором выявлен дефект, в случае целостного состояния конструкции;

- расчет прочности элемента конструкции, в котором выявлен дефект, при наличии расслоившегося дефекта;

- проверка правильности расчетной схемы элемента судовой корпусной конструкции из КМ путем сравнения напряжения, действующего в элементе, в случае целостного состояния конструкции с предельно допустимым напряжением, определенным с учетом изменения характеристик долговечности КМ в процессе эксплуатации;

- сравнение полученной величины напряжения, действующего в расслоившемся элементе судовой корпусной конструкции из КМ с величиной предельно допустимого напряжения, определенного с учетом изменения характеристик долговечности КМ в процессе эксплуатации;

- сравнение полученной величины напряжения, действующего в расслоившемся элементе судовой корпусной конструкции из КМ с величиной предельно допустимого напряжения, вычисленного из условия разрушения.

Предел прочности конструкции определяется достижением такой величины геометрического параметра (площади) внутреннего дефекта типа расслоение, при которой действующие в конструкции напряжения превышают предельно допустимый уровень, установленный нормами проектирования. 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 судовой конструкций из КМ 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.

Оценка изменения прочностных свойств конструкции основывается на сопоставлении ее прочности, проверенной в соответствии с действующими нормами проектирования для нового корпуса, и прочностных свойств той же конструкции, рассчитанных с учетом наличия в конструкции внутренних дефектов типа расслоение, возникших в процессе эксплуатации и имеющих определенную площадь. Она производится одновременно двумя способами:

- путем вычисления нормальных расчетных напряжений от местного изгиба в месте расслоения дискретно без рассмотрения пограничных областей и сравнения полученных значений напряжений с предельно допустимыми значениями напряжений, вычисленными с учетом старения КМ для данной связи корпуса;

- подстановки измеренной дефектоскопом величины площади дефекта в формулу Гриффитса или в формулу Ирвина и вычисления при помощи этих формул критического напряжения в предположении, что размер дефекта данной площади является критическим.

В случае, если критическое напряжение превышает предельно допустимое напряжение, вычисленное с учетом старения КМ для данной связи корпуса, то размер дефекта превышает предельно допустимое значение [4].

Особенности конструкции корпусов судов из КМ позволяют применить положения теории тонких оболочек. Так, при расчете местной прочности каждый элемент корпуса и верхних строений можно рассматривать как отдельную оболочку. При этом вся поверхность корпуса и верхних строений разбивается на семейство многослойных оболочек, для каждой из которых существует методика расчета (рис. 3).

Перечисленное семейство оболочек позволяет с достаточно высокой степенью достоверности описать практически любую поверхность корпуса и верхних строений судна из КМ. Такая разбивка, являясь достаточно условной, в то же время позволяет упростить задачу в пределах достоверности.

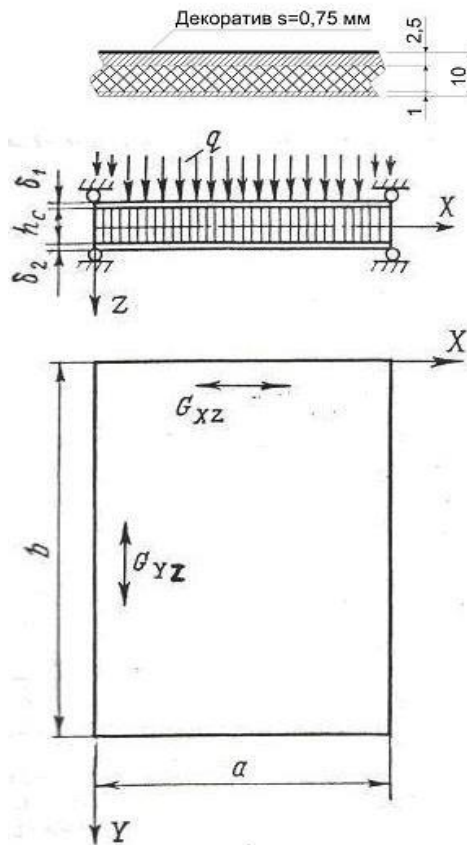


Рис. 3. Пример расчетной схемы плоской трехслойной пластины с легким средним слоем

При практическом расчете оболочек реальная анизотропная структура может быть заменена эквивалентной по механическим свойствам ортотропной структурой, имеющей одинаковые с первой нормальные модули упругости и коэффициенты Пуассона в различных направлениях. Элемент многослойной конструкции рассматривается как пластина или оболочка, состоящая из n числа слоев, изготовленных из ортотропных материалов (рис. 4). Метод расчета анизотропной конструкции, основанный на сведении ее к ортотропной, позволяет с достаточной для практических целей точностью решить целый ряд инженерных задач [5].

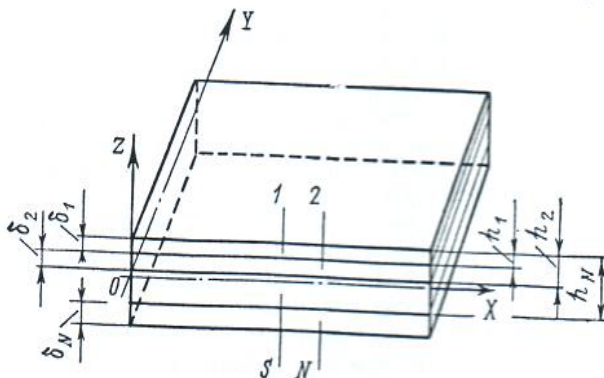


Рис. 4. Элемент многослойной конструкции

Расчет многослойных оболочек из материалов с различными упругими характеристиками конструктивных слоев и упругими свойствами каждого слоя в разных направлениях требует вычисления жесткостей каждого слоя. Суть преобразований приведенных жесткостей состоит в том, что для общего случая упругие свойства конструктивно многослойных оболочек с ортотропными слоями, отличающимися по геометрическим размерам и материалам, приводятся к условному изотропному материалу внутреннего слоя, а параметры жесткостей конструкции — к срединной поверхности оболочки. При выводе формул не учитывается влияние сближения внешних и внутренних слоев, что позволяет принять модуль упругости заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности равным бесконечности. Нормальный модуль упругости заполнителя принимается равным нулю, т. е. в выражение изгибной жесткости трехслойной конструкции вводятся данные только несущих слоев. Анизотропия учитывается за счет использования приведенных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона, вычисленных как среднее геометрическое этих величин по направлениям осей координат КМ [5].

Так, например, в случае анизотропии материала величина $E_{пр}^i$ пластины двухслойной или трехслойной конструкций с легким заполнителем определяется по формуле:

$$E_{пр} = [E_{1в} E_{2в} E_{1н} E_{2н}]^{1/4}, \quad (1)$$

где $E_{1в} E_{2в} E_{1н} E_{2н}$ — модули упругости по направлениям соответственно верхнего и нижнего слоев.

Коэффициенты Пуассона ортотропной панели могут быть определены как:

$$\nu_{в} = [\nu_{1в} \nu_{2в}]^{1/2}, \quad \nu_{н} = [\nu_{1н} \nu_{2н}]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\nu_{1в}, \nu_{2в}, \nu_{1н}, \nu_{2н}$ — коэффициенты Пуассона по направлениям для верхнего и нижнего слоев, соответственно [5].

В разреженном среднем слое с низкой жесткостью могут возникать существенные взаимные смещения внешнего и внутреннего слоев оболочки. Существует методика, позволяющая учитывать нелинейные деформации поперечного сдвига.

На рис. 5 приведены примеры сечений корпуса судна из КМ и расчетных моделей, разработанных с учетом конструктивных узлов, схем армирования и примененных технологических процессов формования корпусных конструкций катера по технической документации ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс»:

- килевая зона (200 мм на каждый борт от линии киля), скуловая зона (250 мм выше и ниже от линии скулы), обшивка днища между реданами, борт, палуба без подкреплений, примыкание днища к транцу (500 мм в нос от линии примыкания) — абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;

- борт, палуба в районе подкреплений — абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким заполнителем;

- транец — абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с жестким на растяжение средним слоем.

В указанных моделях учитывается анизотропия материала по изложенной выше схеме.

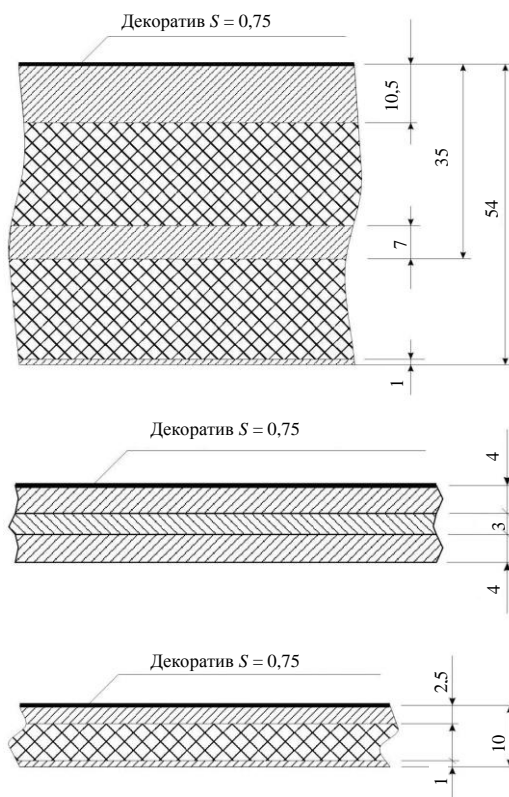


Рис. 5. Образцы сечений многослойной обшивки корпуса судна из композиционных материалов

Слой конструкции, полученный методом напыления, рассматривается как изотропный, поверхности обшивки корпуса — как пластины, жестко заделанные на опорном контуре (линия киля, линии слома борта, линии сочленения борта и палубы, линия примыкания транца) и свободно опертые на открытых зиггах (реданы, декоративные зигги бортов и т. п.) Определение "зиг" является общетехническим термином и представляет собой радиусный или угловатый выступ поверхности материала.

Напряжения в *i*-м элементе абсолютно жесткой целой пластины определяются:

$$\sigma^i = \frac{M_{изз}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D^i}, \quad (3)$$

где $M_{изз}$ — изгибающий момент в центре пластины или в опорном сечении;

E_{np} — приведенный модуль упругости;

z — половина расстояния между срединными поверхностями слоев;

z_0 — смещение нейтральной поверхности от срединной;

D — цилиндрическая жесткость на изгиб.

Приведенный модуль упругости определяется:

$$E_{np} = [E_{\epsilon} E_{\eta}]^{1/2}, \quad (4)$$

где E_{ϵ} , E_{η} — модули упругости соответственно верхнего и нижнего слоев.

Цилиндрические жесткости на изгиб определяются:

– целой двухслойной пластины

$$D = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1 - \nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1 - \nu_{\epsilon}^2} (\delta_{\eta} + \frac{\delta_{\epsilon}}{2} - z_0)^2 + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}^3}{12(1 - \nu_{\eta}^2)} + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}}{1 - \nu_{\eta}^2} (z_0 - \frac{\delta_{\eta}}{2})^2, \quad (5)$$

где δ_{ϵ} , δ_{η} — толщина соответственно верхнего и нижнего слоев;

ν_{ϵ} , ν_{η} — коэффициенты Пуассона соответственно верхнего и нижнего слоев [2].

– целой трехслойной несимметричной пластины с легким заполнителем

$$D = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1 - \nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1 - \nu_{\epsilon}^2} (H - z_0 - \frac{\delta_{\epsilon}}{2})^2 + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}^3}{12(1 - \nu_{\eta}^2)} + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}}{1 - \nu_{\eta}^2} (z_0 - \frac{\delta_{\eta}}{2})^2, \quad (6)$$

где H — высота сечения пластины [2].

– целой трехслойной несимметричной пластины с жестким на растяжение средним слоем

$$D = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1 - \nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1 - \nu_{\epsilon}^2} (H - z_0 - \frac{\delta_{\epsilon}}{2})^2 + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}^3}{12(1 - \nu_{\eta}^2)} + \frac{E_{\eta} \delta_{\eta}}{1 - \nu_{\eta}^2} (z_0 - \frac{\delta_{\eta}}{2})^2 + \frac{E_{cp} \delta_{cp}^3}{12(1 - \nu_{cp}^2)} + \frac{E_{cp} \delta_{cp}}{1 - \nu_{cp}^2} (\delta_{\eta} + \frac{\delta_{cp}}{2} - z_0)^2, \quad (7)$$

где $E_{\text{ср}}$ — модуль упругости среднего слоя;
 $\delta_{\text{ср}}$ — толщина среднего слоя;
 $\nu_{\text{ср}}$ — коэффициент Пуассона среднего слоя [2].

Напряжения в i -м элементе абсолютно жесткой расслоившейся пластины определяются:

$$\sigma_{\text{рас}}^i = \frac{M_{\text{изг}}^i E_{\text{пр}}^i (z - z_0)}{D_{\text{рас}}^i} \quad (8)$$

Цилиндрические жесткости на изгиб расслоившихся пластин определяются [2]:

— двухслойной пластины

$$D_{\text{рас}} = \frac{E_{\text{в}} \delta_{\text{в}}^3}{12(1 - \nu_{\text{в}}^2)} + \frac{E_{\text{н}} \delta_{\text{н}}^3}{12(1 - \nu_{\text{н}}^2)}; \quad (9)$$

— трехслойной несимметричной пластины с легким наполнителем

$$D_{\text{рас}} = \frac{E_{\text{в}} \delta_{\text{в}}^3}{12(1 - \nu_{\text{в}}^2)} + \frac{E_{\text{н}} \delta_{\text{н}}^3}{12(1 - \nu_{\text{н}}^2)}; \quad (10)$$

— трехслойной несимметричной пластины с жестким на растяжение средним слоем

$$D_{\text{рас}} = \frac{E_{\text{в}} \delta_{\text{в}}^3}{12(1 - \nu_{\text{в}}^2)} + \frac{E_{\text{н}} \delta_{\text{н}}^3}{12(1 - \nu_{\text{н}}^2)} + \frac{E_{\text{ср}} \delta_{\text{ср}}^3}{12(1 - \nu_{\text{ср}}^2)}; \quad (11)$$

С учетом сложных конфигураций дефектов их размер с определенной степенью достоверности может составить:

$$l = \sqrt{S_{\text{д}}}, \quad (12)$$

где $S_{\text{д}}$ — площадь дефекта, определенная дефектоскопом.

В этом случае формулы расчета критического напряжения в районе расположения дефекта с использованием критерия Гриффитса (уравнение (13)) и с использованием критерия Ирвина (уравнение (14)) примут вид:

$$\sigma_c = \left[\frac{\gamma E_{\text{пр}}}{\pi (S_{\text{д}})^{1/2} (1 - \nu^2)} \right]^{1/2}. \quad (13)$$

$$\sigma_c = K_c \left[\frac{1}{\pi (S_{\text{д}})^{1/2}} \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Величины γ или K_c , определяемые экспериментальным путем, принимаются по справочной литературе [4].

Исходя из изложенного, можно записать условия обеспечения прочности конструкции в зоне расслоения уравнением (15) и нераспространения дефекта уравнение (16) можно записать, как:

$$\sigma_{\text{рас}}^i \leq \sigma_0 \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{рас}}^i \leq \sigma_c. \quad (16)$$

В случае невыполнения условий (15), (16) можно говорить о достижении дефектом размеров, при которых при эксплуатационных нагрузках может возникнуть его уверенный рост.

Известно, что при развитии расслоения на величину, меньшую некоторой критической, между краями остаются некоторые остаточные упругие спайки, уменьшающие действующие в зоне расслоения напряжения. Лишь при достижении некоторого критического расстояния между слоями эти спайки окончательно разрушаются, а слои КМ перестают каким-либо образом взаимодействовать друг с другом. Наличие этих спаек обеспечивает определенный запас прочности конструкции. Выполненный расчет позволяет обосновать необходимость ремонта корпусной конструкции в случае, при котором до ее разрушения еще далеко.

Для проверки работоспособности способа при помощи компьютерной программы *Microsoft Excel* был выполнен расчет изменения механических свойств судовой корпусной конструкции из КМ для катера "Аквалайн 210" производства ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс» (г. Самара, Россия). Техническая документация, включающая сборочные чертежи корпуса этого судна, была передана производителем в Московский филиал РРР, под техническим наблюдением которого находятся суда этого проекта. В результате расчета установлено, что в случае возникновения зоны расслоения площадью 440 мм² на днищевом перекрытии обеспечиваются условия прочности нового корпуса и не происходит его разрушение. Если же в конце срока службы корпуса (ориентировочно через 18 лет после постройки) действующее в зоне расслоения напряжение превышает допустимое напряжение более чем в 1,5 раза, а критическое напряжение — более чем в 2,5 раза (т. е. условия прочности конструкции не выполняются), то может произойти разрушение корпуса при штатных эксплуатационных условиях. Поэтому корпус катера требует соответствующего ремонта.

Применение изложенного выше способа позволяет выполнить необходимые расчеты и дать рекомендации по нескольким десяткам дефектов в течение одного рабочего дня, что делает способ доступным для специалистов, занимающихся вопросами определения технического состояния корпуса судна из КМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Францев М. Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных мате-

риалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок // Труды Государственного Крыловского Научного Центра. Вып. 75(359). — СПб., 2013. С. 192—200.

2. Черепанов Г. П. Механика разрушения многослойных оболочек. Теория трещин расслаивания // Прикладная математика и механика. 1983. Т. 47. Вып. 5. С. 832—845.

3. Баженов С. Л. и др. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян — Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2010. — 354 с.

4. Францев М. Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации // Контроль. Диагностика. 2009. № 11. С. 61—68.

5. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. — М: Машиностроение, 2003. — 447 с.

Determining of loss degree of strength properties and assess of destruction possibility of ship's hull structure of the composite in the area of operational defect such as delamination

M. E. FRANTSEV

JSC "Neptun-Sudomontazh", Dolgoprudnyy, Moscow region, Russia

There is method of loss degree determining of strength properties of ships hull structure in the article. Method allows to estimate of possibility of the destruction of the boat hull structure of the composite in the area of operational of defect type delamination for exploitation. There is the theoretical basis of the method. There are the results of the calculation examples of the practice of technical operation. Application of this method allows to perform necessary calculations and give recommendations to several tens of defects in short time, what makes the process accessible to professionals involving in determining the technical condition of the hull of the composites.

Keywords: boat hull, composites, internal defect type delamination, loss degree of strength.

* * *