

УДК 629.12.001

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПУСА СКОРОСТНОГО СУДНА
ИЗ КОМПОЗИТОВ ПО УСЛОВИЯМ ЕГО ВЕСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

М. Э. Францев

PRINCIPLES OF DESIGNING HIGH-SPEED SHIP HULL FROM COMPOSITES
BASED ON ITS WEIGHT EFFICIENCY AND LIFE CYCLE

M. E. Frantsev

Минимум водоизмещения порожнем скоростного судна из композитов обеспечивается за счет наименьшей массы его корпуса при равных других статьях нагрузки. Приведены проектировочные уравнения, обосновывающие критерий минимума толщины обшивки корпуса из композитов. Эксплуатационное поведение композита учитывается развитием в нем внутренних дефектов типа расслоение, а также изменением характеристик прочности и долговечности в районе дефекта. Расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение по критерию Бейли выполнен для группы судов из композитов, прошедших операцию дефектоскопии в Московском регионе. Также расчеты сделаны для внутренних дефектов в трех случаях: пластина в новом корпусе, пластина в корпусе в конце его жизненного цикла, а также оценка вероятности разрушения новой пластины с дефектом типа расслоение. Старение композита учитывали по Правилам Российского Речного Регистра (далее РРР). В первом случае запас прочности целой пластины и пластины с дефектом обеспечен, во втором – нет, в третьем – вероятен рост дефекта. Во втором и третьем случаях техническое состояние корпуса судна из композитов может быть признано, соответственно, ограничено годным и негодным.

проектирование скоростных судов из композитов, весовая эффективность, жизненный цикл, внутренние дефекты типа расслоение

Minimum bare displacement of a high-speed ship from composites is ensured by the minimum weight of its hull. Engineering equations are given to justify the criterion of the minimum plate thickness of a hull from composites. Composites behavior for exploitation takes into account the development of internal defects such as delamination as well as changes in the characteristics of strength and durability of the composite in the area of the defect. The calculation of the concentration of internal defects such as delamination using Bailey criterion is made for a group of high-speed vessels from composites that have passed defectoscopy in the Moscow region. Also, calculations are made for internal defects for three cases: the plate in the new building, the plate in the hull at the end of the life cycle and the probability of the new plate fracture which has the internal defect such as delamination. Aging of the composite was based on the Rules of the Russian River Register (RRR). In the first case strength margin of the whole plate and the plate with a defect is

ensured. In the second case – it is not. In the third case internal defect is likely to increase. In the second and third cases the technical condition of the hull from the composites can be conditionally qualified and disqualified.

design of high-speed vessels made of composites, weight efficiency, life cycle, internal defects such as delamination

ВВЕДЕНИЕ

Объективная оценка экономической эффективности эксплуатации скоростного судна из композитов (чаще всего глиссирующего) опирается на использование определенных критериев. В качестве таких критериев, например, для скоростных судов используются их интегрированные расходные характеристики, включающие удельный расход топлива главных двигателей, их мощность, полную массу судна, скорость, а также характеристики их полезной нагрузки. Известно, что наибольшую долю в совокупной структуре прямых расходов на эксплуатацию скоростного судна составляют расходы на топливо. Поэтому при анализе эффективности эксплуатации любых типов скоростных судов, в том числе судов из композитов, целесообразно выполнить сравнительный анализ их интегрированных расходных характеристик. Подробнее эти вопросы рассмотрены в работе [1].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основного критерия эффективности целесообразно принять условие минимизации расхода топлива скоростного судна на перемещение 1 т дедвейта (полезной нагрузки) на 1 км пути в виде:

$$P_{DW} = \frac{qN}{D\eta v} \rightarrow \min . \quad (1)$$

Для пассажирских скоростных судов к основному критерию может быть добавлено условие минимизации расхода топлива на перемещение одного пассажира на 1 км пути (на 1 пасс-км) в виде:

$$P_{ПАСС} = \frac{qN}{nv} \rightarrow \min . \quad (2)$$

Рассмотрим принципы повышения характеристик эффективности скоростного судна из композитов, реализуемых на этапе проектирования с использованием данных критериев.

Представим нагрузку масс скоростного судна из композитов в виде:

$$D = \sum_{i=1}^n P_i = D_{nop} + DW , \quad (3)$$

где P_i – статья нагрузки; D_{nop} – водоизмещение порожнем; DW – дедвейт (полезная нагрузка).

Из условия (1) следует, что для обеспечения необходимых характеристик экономичности скоростное судно должно иметь наибольшее соотношение между его полезной нагрузкой и полной массой:

$$\eta = \frac{DW}{D} \rightarrow \max . \quad (4)$$

Дедвейт скоростного судна может быть представлен как разность между полной массой судна и его водоизмещением порожнем (собственным весом судна), тогда:

$$\eta = \frac{D - D_{nop}}{D} \rightarrow \max ; \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{D_{nop}}{D} \rightarrow \max ; \quad (6)$$

$$\frac{D_{nop}}{D} \rightarrow \min . \quad (7)$$

Способы повышения экономической эффективности скоростного судна при применении в его конструкции композитов рассмотрены в работе [2]. Важно отметить, что число марок двигателей, которые могут быть установлены на скоростные суда, ограничено. Поэтому основным резервом увеличения полезной нагрузки скоростного судна из композитов является правильное проектирование его корпуса, заключающееся в оптимальном сочетании массы корпуса, а также его общей и местной прочности.

Подсистема «Корпус» является доминирующей среди подсистем первого уровня декомпозиции судна как системы. Уравнение нагрузки скоростного судна, в состав которого масса корпуса входит в качестве слагаемого, может быть выражена как

$$D = \sum P_i = P_k + \sum P_{i-1} = q_k(LBH) + \sum P_{i-1} , \quad (8)$$

где P_k - масса по статье нагрузки «Корпус»; $\sum P_{i-1}$ - масса по статьям нагрузки без статьи «Корпус»; L, B, H - длина, ширина, высота корпуса; q_k - кубический модуль, представляющий собой отношение массы корпуса к его объему, определяемый с помощью анализа баз данных.

Уравнения (3-8) при фиксированных размерах судна ($L, B, H=const$) определяют условие его минимального водоизмещения порожнем (собственного веса судна). Минимизация водоизмещения порожнем скоростного судна осуществляется за счет снижения до минимума массы корпуса и надстройки при прочих равных статьях нагрузки. При этом существует условие обеспечения характеристик прочности и долговечности корпуса, т. е. его жизненного цикла. Условие минимизации массы корпуса может быть записано как

$$P_k \rightarrow \min . \quad (9)$$

Масса по статье «Корпус» скоростного судна из композитов также может быть определена, как масса наружной обшивки, масса набора, масса блоков плавучести и сумма масс элементов обстройки и оборудования помещений, интегрированных в конструкцию корпуса.

Масса корпуса из композитов может быть представлена как

$$P_{кор} = P_{оби} + P_{наб} + P_{БП} + \sum_{\kappa} P_{\kappa} . \quad (10)$$

Рассмотрим первые три слагаемые в приведенной формуле. Сумма масс элементов обстройки и оборудования помещений, интегрированных в конструкцию корпуса из композитов, относительно невелика (она обычно

составляет до 5-10% общей массы корпуса) и мало зависит от геометрических размеров судна. В дальнейших расчетах эта сумма достаточно корректно может быть учтена соответствующим коэффициентом пропорциональности.

Масса блоков плавучести определяется по формуле

$$P_{БП} = \rho_{БП} V_{БП}, \quad (11)$$

где $\rho_{БП}$ – плотность материала блоков плавучести; $V_{БП}$ – объем блоков плавучести, определенный при обосновании непотопляемости.

Наибольшее влияние на обеспечение общей и местной прочности корпуса из композитов имеет обшивка, подкрепленная набором. Блоки плавучести, интегрированные в конструкцию корпуса из композитов, незначительно воздействуют на обеспечение общей и местной прочности, поэтому на начальном этапе проектирования корпуса из композитов с высокой весовой эффективностью они из рассмотрения исключаются. Представим часть массы корпуса в виде первых двух слагаемых. Она может быть представлена как

$$P_{кор1} = P_{обш} + P_{наб} = \rho_{км} t_{ср} b [a_1 (\delta_k L_{габ} B_{габ} H)^{2/3} + \alpha_1 (L_{габ} - L_n)(B_{габ} - B_n) + a_2 (\delta_n L_n B_n H_n)^{2/3}] , \quad (12)$$

где $P_{кор1}$ – часть массы корпуса в виде массы обшивки и набора; $L_{габ}$, $B_{габ}$ – габаритная длина и ширина корпуса; H – высота борта; L_n , B_n – габаритная длина и ширина надстройки; H_n – высота надстройки; δ_k , δ_n – коэффициенты полноты формы корпуса и надстройки; a_1 , a_2 – коэффициенты пропорциональности; α_1 – коэффициент полноты ватерлинии на уровне палубы; b – коэффициент, позволяющий учесть массу набора в массе композитного корпуса; $t_{ср}$ – средняя толщина обшивки; $\rho_{км}$ – плотность композита, определяемая по формуле:

$$\rho_{км} = \frac{k_{св} p_{св} + k_{арм} p_{арм}}{2}, \quad (13)$$

где $p_{св}$ – удельный вес связующего; $k_{св}$ – коэффициент, учитывающий содержание связующего в составе композиции; $p_{арм}$ – удельный вес армирующих материалов; $k_{арм}$ – коэффициент, учитывающий содержание армирующих материалов в составе композиции.

Средняя толщина обшивки корпуса $t_{ср}$ на начальном этапе проектирования может быть определена с помощью уравнения прочности.

Изгибающий момент, действующий на корпус судна из композитов, с учетом влияния волн и скорости судна может быть определен как

$$M_{\max} = \frac{DL}{k_1}, \quad (14)$$

где M_{\max} – изгибающий момент корпуса от общего изгиба; D – полное водоизмещение судна; L – расчетная длина корпуса; k_1 – коэффициент, учитывающий влияние волн и скорости судна, который может определяться различными способами. Например, в соответствии с положениями [3] величина коэффициента k_1 может определяться как

$$k_1 = (3 + 23,4e^{-1,1Fr_D}) \sqrt{\frac{2,5}{h_г}}, \quad (15)$$

где Fr_D – число Фруда по водоизмещению; $h_г$ – расчетная высота волны.

Уравнение прочности корпуса судна из композитов также имеет вид:

$$M_{\max} = k\sigma_{0KM}W, \quad (16)$$

где M_{\max} - изгибающий момент от общего изгиба судна в наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки; σ_{0KM} - предел прочности композита; k – коэффициент пропорциональности; W - момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса в наиболее нагруженном состоянии.

Момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе судна из композитов, в свою очередь, может быть представлен как

$$W = \frac{\eta_k FH}{2}, \quad (17)$$

где F – площадь наиболее опасного поперечного сечения эквивалентного бруса; η_k – коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

Приравнявая выражения (14) и (16) с учетом (17), получим уравнение:

$$\frac{DL}{k_1} = \frac{k\sigma_{0KM}\eta_k FH}{2}. \quad (18)$$

Корпус скоростного судна из композитов в целях расчета общей прочности может рассматриваться как балка с непризматическим сечением. С помощью уравнения прочности при общем изгибе (18) может быть определено допускаемое напряжение для композита корпуса скоростного судна:

$$\sigma_{0KM} = \frac{2DL}{kk_1\eta_k FH}. \quad (19)$$

В отличие от судов из традиционных материалов (кроме деревянных судов) общая прочность корпуса судна из композитов в большой степени обеспечивается его обшивкой, которая имеет достаточно большую толщину и сложную форму, за счет чего редуцирующий коэффициент близок единице.

Поэтому момент сопротивления эквивалентного бруса без учета площади продольного набора, которая, как правило, невелика, на этом этапе проектного обоснования может быть представлен как

$$W = \eta_k (B_{заб} + H)t_{cp}H, \quad (20)$$

где t_{cp} – средняя толщина обшивки.

Средняя толщина обшивки корпуса в сечении, где действует наибольший изгибающий момент, может быть представлена как

$$t_{cp} = \frac{W}{\eta_k (B_{заб} + H)H}. \quad (21)$$

С учетом уравнений (18) и (20) средняя толщина обшивки корпуса t_{cp} может быть определена как

$$t_{cp} = \frac{2DL}{kk_1\eta_k (B_{заб} + H)H\sigma_{0KM}} \quad (22)$$

Полученное значение средней толщины обшивки корпуса скоростного судна из композитов, определенное из условия обеспечения общей прочности, также проверяется по условиям обеспечения местной прочности и при необходимости корректируется.

Особенности конструкции корпусов судов из композитов в целях расчета местной прочности позволяют применить положения теории тонких оболочек. Поэтому можно рассматривать каждый элемент поверхности корпуса и верхних строений как отдельную пластину или оболочку. При этом вся поверхность корпуса и верхних строений разбивается на ряд многослойных пластин и оболочек из композитов, для каждой из которых существует методика расчета. Эта совокупность пластин и оболочек позволяет с достаточно высокой степенью достоверности описать практически любую поверхность корпуса и надстройки судна из композитов. Такая разбивка, являясь достаточно условной, в то же время позволяет упростить задачу в пределах достоверности.

При анализе уравнения (22) видно, что для скоростного судна из композитов при фиксированных геометрических размерах корпуса условие его весовой эффективности (9) трансформируется в условие минимизации толщины его обшивки:

$$t_{cp} \rightarrow \min . \quad (23)$$

Высокие эксплуатационные характеристики судов из композитов могут обеспечить эффективные оптимальные судовые корпусные конструкции, имеющие минимальное ухудшение прочностных свойств в процессе эксплуатации. Под оптимальной конструкцией из композита понимается такая, работающая наилучшим образом при эксплуатационных нагрузках и удовлетворяющая заданному критерию оптимальности. Поэтому одним из центральных вопросов обеспечения жизненного цикла эффективной оптимальной подсистемы «Корпус» судна из композитов при проектировании является гарантирование ее характеристик прочности и долговечности в течение экономически обоснованного жизненного цикла.

Для проектирования и изготовления эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из композитов предпочтительны технологии формообразования, способные изменять параметры оптимизации конструкций в широких пределах, например, вакуумная инфузия или различные виды RTM-процессов [4].

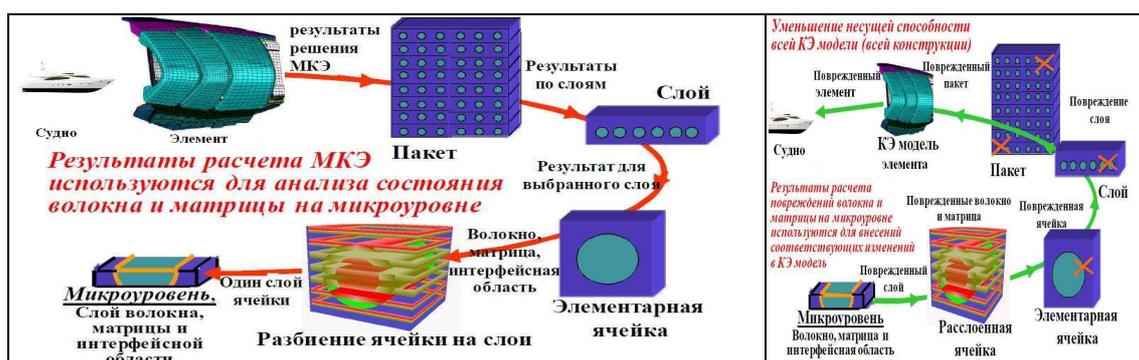


Рис. 1. Последовательность декомпозиции и оценки влияния внутреннего дефекта при определении прочностных свойств корпуса судна из композитов

Fig. 1. Sequence of decomposition and assessment of the impact of internal defect at determining structural behavior of the ship hull from composites

Известно, что использование различных технологий изготовления судовых корпусных конструкций из композитов сопровождается появлением технологических дефектов типа расслоение и непроклей, которые влекут за собой снижение характеристик прочности. В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа расслоение. Это обстоятельство требует от проектанта выполнения при оценке прочности судового корпуса из композитов специального расчета, направленного на учет влияния внутреннего дефекта технологической и эксплуатационной природы на прочность элемента конструкции (рис. 1).

В процессе эксплуатации на корпус судна из композитов действуют различные эксплуатационные нагрузки. Природа, характер и продолжительность воздействия этих нагрузок на корпус судна из композитов целиком и полностью идентичны аналогичным характеристикам эксплуатационных нагрузок, действующих на корпуса судов, изготовленные из традиционных материалов. В то же время, эксплуатационное поведение элементов корпуса из композитов изучено недостаточно. В связи с этим при проектировании судовых конструкций из таких материалов проблемы обеспечения характеристик их прочности и долговечности решаются не вполне корректно.

В работах [5, 6] предложен подход, при котором для оценки и прогнозирования технического состояния корпусных конструкций промышленных судов, содержащих эксплуатационные дефекты, применена теория потоков. При этом установлена взаимосвязь потока внешних нагрузок с потоком повреждений корпусных конструкций на вероятностной основе в виде результирующей функции, связывающей параметры эксплуатационного дефекта в начальный и конечный моменты времени, собственно, время и вероятность возникновения дефекта.

Данный подход позволяет прогнозировать возникновение и развитие эксплуатационного дефекта. Он дает возможность определять время и вероятность достижения каким-либо дефектом наперед заданного уровня, нормировать дефекты при ограничении времени и условий эксплуатации судна, накладывать ограничения на условия эксплуатации судна с целью обеспечения экономически обоснованного жизненного цикла с заданной вероятностью.

Разработка норм проектной годности судовой корпусной конструкции из композита при условии существования в ней внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности разрушения.

Оценка изменения характеристик долговечности представляет собой сопоставление прочностных свойств целой и расслоившейся конструкций в начальный и конечный моменты эксплуатации, рассчитанных в соответствии с действующими нормами проектирования. Вопросы изменения характеристик долговечности тесно связаны с вопросами оценки технического состояния судовой корпусной конструкции из композита, а также методами определения степени утраты прочностных свойств и анализом возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композита в зоне развития дефекта типа расслоение технологической и эксплуатационной природы. Все эти вопросы рассмотрены в работах [7, 8].

Существует несколько точек зрения на проблему прогнозирования изменения прочности композитов. Широко распространенный традиционный путь прогнозирования и нормирования прочности корпусных конструкций, базирующийся на эмпирических подходах и непосредственном увязывании расчетных коэффициентов запаса прочности с результатами целенаправленно поставленных экспериментов, постепенно утрачивает свою эффективность, так как они не отражают реального воздействия всех факторов эксплуатации и, как следствие, не позволяют получать корректные решения.

Необходимо отметить, что специфика изменения характера и механизма динамического разрушения полимерных композитов в жидкостях, в том числе связанного с изменением температуры, что свойственно, например, для наружной обшивки корпуса глиссирующего судна, создает принципиальные затруднения в разработке методов ускоренных динамических испытаний, воспроизводящих реальные условия. Подробнее вопросы прогнозирования накопления внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы, а также возникновения условий, приводящих к разрушению судовой корпусной конструкции из композитов, рассмотрены в работе [9].

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

Для произвольных процессов нагружения во времени при относительно простых напряженных состояниях критерий суммирования повреждений Бейли для времени разрушения t будет иметь вид:

$$\int_0^t \frac{dt}{t(\sigma)} = 1, \quad (24)$$

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

Принципы возникновения внутренних дефектов типа расслоение, их форм и месторасположения на корпусе, а также систематическое их обнаружение в больших количествах в определенных местах открывают путь к разработке количественных методов определения их взаимосвязи с режимами нагружения, обусловленными характеристиками полной массы, мощности и скорости судна, продолжительностью и интенсивностью эксплуатации. Обработка данных, полученных в результате наблюдений, методами регрессионного анализа дает возможность вывести формализованные зависимости, позволяющие анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов. Для корректной обработки данных и получения зависимостей в виде функций необходима группировка по достаточно большому количеству судов одного проекта, имеющему различный ресурс использования [7, 9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных данных произведена попытка проследить зависимость между накоплением в корпусе из композитов дефектов типа

расслоение, энерговооруженностью и ресурсом использования судна. Методика учета концентрации дефектов эксплуатационного характера на корпусе судна из композитов разработана в соответствии с системой нормирования прочности, построенной на учете статистического и отчасти временного факторов (для переменных нагрузок). Расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение в соответствии с критерием Бейли выполнен для группы судов из композитов на основании базы данных судов, прошедших операцию дефектоскопии при освидетельствовании на предмет годности к плаванию в Московском филиале РРР в 2007-2010 гг. В качестве обобщающей характеристики принят интегральный ресурс использования, определяемый произведением энерговооруженности на время эксплуатации. При расчете была вычислена концентрация внутренних дефектов типа расслоение как отношение суммарной площади дефектов к общей площади поверхности обшивки в исследуемом районе на каждом из корпусов [11]. Полученные значения величины коэффициента концентрации аппроксимированы по линейному закону:

$$K = f(t) = 0,1531t + 241,4, \quad (25)$$

где K – коэффициент концентрации расслоений; t – ресурс использования корпуса.

Выполненный расчет подтверждает принципиальную возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений в варианте Бейли для анализа и прогнозирования изменения характеристик долговечности корпусов судов из композитов под действием эксплуатационных нагрузок в течение жизненного цикла корпуса. Расчет также подтверждает существование взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками судна из композитов в виде энерговооруженности и различных форм ресурса использования и концентрацией дефектов. На начальных этапах проектирования в качестве прогноза изменения характеристик прочности и долговечности корпуса судна из композитов может рассматриваться прогноз роста концентрации дефектов, описываемой значениями полученной аппроксимирующей функции на жизненном цикле.

Для вывода более точных формализованных зависимостей, позволяющих анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов, требуется обработка множества данных методами регрессионного анализа по существенно большему количеству судов из композитов различных размеров и энерговооруженности, близких лет выпуска.

Ниже приведен пример использования способа оценки изменения характеристик долговечности корпуса скоростного судна из композитов на его жизненном цикле. Для примера взято глиссирующее судно «Аквалайн 210» проекта и постройки ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс» (г. Самара, Россия). Техническая документация, включающая сборочные чертежи корпуса этого судна, была передана производителем в Московский филиал РРР, где суда этого проекта находятся под техническим наблюдением.

Произведены расчеты напряжений, действующих в элементе судового корпуса, выбран элемент в виде пластины из композитов днищевой обшивки. В пластине имеется внутренний дефект типа расслоение. Прочность пластины рассматривается в начальный и конечный моменты жизненного цикла корпуса.

Численное решение получено для внутреннего дефекта типа расслоение технологической или эксплуатационной природы площадью 440 мм^2 , расположенного в одном и том же месте на днищевом перекрытии, недалеко от скулы. Расчеты выполнены для трех случаев. В первом случае рассматривалась пластина в новом корпусе, содержащая дефект типа расслоение указанного размера технологической природы. Во втором случае расчет производился для пластины, содержащей дефект площадью 440 мм^2 эксплуатационной природы, из состарившегося композита в конце срока его службы (жизненного цикла судна), у которого изменившиеся механические характеристики рассчитывались по Правилам РРР [12]. В третьем – оценивалась возможность разрушения композита новой пластины в районе дефекта технологической природы указанного размера. Разрушение считалось возможным при достижении действующим напряжением величины критического напряжения. В первых двух случаях для корректного определения величины действующих напряжений численные решения получались одновременно и для целых участков пластин, расположенных рядом с дефектами. Численные решения были получены с использованием программы Microsoft Excel. Физические величины в расчетах приняты в единицах системы МКГСС. Это связано с тем, что коэффициенты в уравнениях изгиба пластин и эмпирические коэффициенты в других формулах получены для физических величин, имеющих эту размерность.

В результате выполненных расчетов установлено, что действующее напряжение в целой пластине нового корпуса меньше допустимого напряжения примерно в два с половиной раза. В зоне расположения дефекта типа расслоение технологической природы действующее напряжение примерно равно допустимому напряжению, что указывает на достаточно большие запасы прочности корпусных конструкций из композитов у отечественных скоростных судов (рис. 2 слева). Эти же величины рассчитаны для корпуса из композитов в конце срока его службы (жизненного цикла судна) с учетом старения композита по Правилам РРР (рис. 2 в центре). Расчет показывает, что для целой пластины корпуса судна в конце срока эксплуатации условие прочности не выполняется и необходимый запас прочности не обеспечен, так как действующее напряжение примерно в полтора раза превышает допустимое напряжение. В связи с этим необходимы ограничения по скорости судна на гладкой воде и в его эксплуатации на волнении. В районе расположения дефекта типа расслоение действующее напряжение в состарившемся корпусе примерно в четыре раза превышает допустимое напряжение и возможно разрушение конструкции в расчетном режиме эксплуатации. Кроме того, выполненный расчет критических напряжений показывает (рис. 2 справа), что в районе расположения дефекта типа расслоение действующее напряжение в новом корпусе превышает величину критического напряжения.

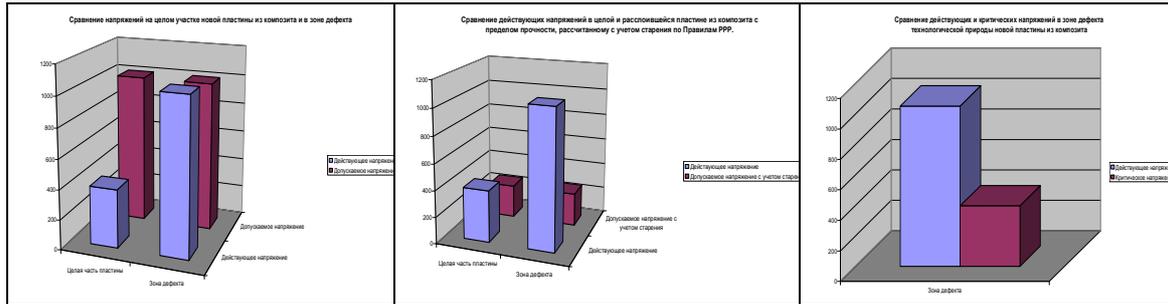


Рис. 2. Действующие и допускаемые напряжения в целой новой пластине из композита и в зоне дефекта (слева) в целой пластине из композита и в зоне дефекта с учетом старения по Правилам РРР (в центре) действующие и критические напряжения в новой пластине из композита (справа)
 Fig. 2. Effective and allowable voltage in a whole new composite plate, and in the defect zone (on the left) in the whole composite plate, and in the defect zone subject to aging, based on Rules of RRR (in the center) effective and critical voltage of the new composite plate (on the right)

Следовательно, в условиях движения судна в расчетном режиме, в условиях расчетного волнения будет продолжаться рост размеров дефекта. По критерию нераспространения дефекта в композите техническое состояние корпусной конструкции в этом случае может быть признано негодным.

ВЫВОДЫ

Использование данных о динамике развития эксплуатационных дефектов в корпусных конструкциях близкого прототипа, полученных методами неразрушающего контроля при проектировании корпуса скоростного судна из композитов по условию весовой эффективности, позволяет достоверно учесть всю гамму ожидаемых эксплуатационных факторов. Это дает возможность выдвинуть ряд новых теорий и критериев прочности судовых корпусных конструкций из композитов, основанных на концепции накопления повреждений в процессе эксплуатации, а кроме того, позволяет прогнозировать изменение эксплуатационной прочности конструкций проектируемого судна в течение всего его жизненного цикла и в конечном итоге делать выводы о долговечности конструкции из композита в целом без существенного удорожания проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Францев, М. Э. Проектное обоснование обеспечения характеристик экономичности и конкурентоспособности скоростного пассажирского судна / М. Э. Францев // IX Прохоровские чтения: сборник трудов конференции. - Нижний Новгород, 2013. - С. 94-98.
2. Францев, М. Э. Проектное обоснование повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке за счет применения в его конструкции композиционных материалов / М. Э. Францев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. - № 1, 2015. - С. 197-202.

3. ОСТ5.1068-75 «Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности». – Ленинград: ЦНИИТС, 1975.
4. Nazarov, A. Small Boats for a Global Market / A. Nazarov // Professional Boatbuilder. - Vol.131, 2011.
5. Бураковский, Е. П. Об одной задаче нормирования общей прочности корпусов судов, содержащих эксплуатационные дефекты / Е. П. Бураковский, В. А. Дмитриевский // Судостроение и энергетические установки: сборник научных трудов Калининградского государственного технического университета, посвященный 300-летию Российского флота, Калининград, 1996. - С. 251-262.
6. Бураковский, Е. П. Применение теории потоков при оценке и прогнозировании технического состояния корпусных конструкций, содержащих эксплуатационные дефекты / Е. П. Бураковский, В. А. Дмитриевский // Судостроение и энергетические установки: сборник научных трудов Калининградского государственного технического университета, посвященный 300-летию Российского флота, Калининград, 1996. - С. 263-278.
7. Францев, М. Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации / М. Э. Францев // Контроль. Диагностика. - № 11, 2009. - С. 61-68
8. Францев, М. Э. Определение степени утраты прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композита в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение / М. Э. Францев // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти академика Ю. А. Шиманского, 2013. – Санкт-Петербург. – С. 124-126.
9. Францев, М. Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов / М. Э. Францев // Морской вестник. – № 4(28), 2008. – С. 93 – 98.
10. Францев, М. Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок / М. Э. Францев // Труды Государственного Крыловского научного центра. – Вып. 75(359). – Санкт-Петербург, 2013. – С. 192-200.
11. Францев, М. Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов / М. Э. Францев // Конструкции из композиционных материалов. – № 3. – 2011. – С. 86–97.
12. Российский Речной Регистр. Правила. – Т. 2. – Москва, 2008. – 400 с.

REFERENCES

1. Francev M. Je. Proektnoe obosnovanie obespechenija harakteristik jekonomichnosti i konkurentosposobnosti skorostnogo passazhirskogo sudna [Design rationale for promotion of economic feasibility and competitiveness of a high-speed passenger vessel]. *Sbornik trudov konferencii «9-e Prohorovskie chtenija»*, 2013, Nizhnij Novgorod, pp. 94-98.
2. Francev M. Je. Proektnoe obosnovanie povyshenija poleznoj nagruzki amfibijnogo sudna na vozduшной podushke za schet primenenija v ego konstrukcii kompozicionnyh materialov [Design rationale for increase of useful load of an amphibious air-cushion vessel by means using composite materials in its construction]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. R. E. Alekseeva*, 2015, no. 1, pp. 197-202.

3. OST5.1068-75 «Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчёты прочности». CNIITS, L., 1975.
4. Nazarov A. Small Boats for a Global Market. Professional Boatbuilder, 2011, vol. 131.
5. Burakovskij E. P., Dmitrovskij V. A. Ob odnoj zadache normirovanija obshhej prochnosti korpusov sudov, sodержashhih jekspluacionnye defekty [The problem of standardization of bulk strength of hulls with operational defects]. *Sbornik nauchnyh trudov Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, posvjashhennyj 300-letiju Rossijskogo flota*, Kaliningrad, 1996, pp. 251-262
6. Burakovskij E. P., Dmitrovskij V. A. Primenenie teorii potokov pri ocenke i prognozirovanii tehničeskogo sostojanija korpusnyh konstrukcij, sodержashhih jekspluacionnye defekty [Application of flow theory in assessment and predication of the technical state of hull structures with operational defects]. *Sbornik nauchnyh trudov Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, posvjashhennyj 300-letiju Rossijskogo flota*, Kaliningrad, 1996, pp. 263-278
7. Francev M. Je. Sposob ocenki tehničeskogo sostojanija korpusa sudna iz kompozitov v processe jekspluacii [Method of structural assessment of ship hull from composites while in operation]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2009, no. 11, pp. 61-68
8. Francev M. Je. Opredelenie stepeni utraty prochnostnyh svojstv i ocenka vozmožnosti razrušenija sudovoj korpusnoj konstrukcii iz kompozita v zone razvitiya jekspluacionnogo defekta tipa rassloenie [Evaluation of the degree of strength loss and assessment of possibilities for damage of ship composite hull in the area of operational defect such as delamination]. *Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-tehničeskoi konferencii po stroitel'noj mehanike korablja, posvjashhennoj pamjati akademika Ju.A. Shimanskogo*. Saint-Petersburg, 2013, pp. 124-126
9. Francev M. Je. Proektnaja ocenka jekspluacionnyh nagruzok i harakteristik dolgovechnosti korpusov sudov iz kompozicionnyh materialov [Engineering estimate of operational loads and lifetime performance of ship composite hulls]. *Morskoj vestnik*, no. 4(28), 2008, pp. 93-98.
10. Francev M. Je. Jekspluacionnoe povedenie jelementov korpusa glissirujushhego sudna iz kompozicionnyh materialov v uslovijah vozdejstviya gidrodinamičeskikh nagruzok [Operational behavior of hull components of a planing boat from composites under hydrodynamic load]. *Trudy Gosudarstvennogo Krylovskogo nauchnogo centra*. Saint-Petersburg, 2013, vol. 75(359), pp. 192-200.
11. Francev M. Je. Proektnye rekomendacii po opredeleniju naibolee nagruzhennyh i ujazvimyh jelementov korpusa sudna iz kompozicionnyh materialov [Design recommendations for determination of the most laden and weak elements of a ship hull from composites]. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, 2011, no. 3, pp. 86-97.
12. Rossijskij rečnoj registr. Pravila, vol. 2, Moscow, 2008, 400 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Францев Михаил Эрнстович – Инжиниринговая компания «Нептун-Судомонтаж»,
г. Долгопрудный Московской области; кандидат технических наук, директор;
E-mail: gepard629@yandex.ru

Frantsev Mikhail Ernstovich – JSC “Neptun-Sudomontazh; PhD, Director;
E-mail: gepard629@yandex.ru