

**Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок.**

### **Введение.**

Сегодня большую часть мирового малотоннажного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов. Однако в современной России они проектируются и строятся в весьма ограниченных количествах. Применение композитов позволяет создавать суда с высокими аэро- и гидродинамическими характеристиками, с легкими надстройками, эффектным дизайном внешнего облика и рядом других достоинств. Одним из важнейших направлений применения в судовой конструкции композиционных материалов является создание судов с повышенной весовой эффективностью.



**Рис. 1. Общий вид японского промыслового судна из композитов современного типа (обводы типа «глубокое V»)**

Широкое использование композитов в качестве конструкционного материала судовых корпусов, особенно в скоростном малотоннажном судостроении, привело к тому, что, по мере накопления опыта проектирования, строительства и эксплуатации судов из этих материалов, конструкция их корпусов стала существенно отличаться от конструкции корпусов судов, изготовленных из традиционных материалов. Корпус современного судна из композитов это система поверхностей, образующих объемно - прочную конструкцию. При этом каждая из поверхностей корпуса, палубы и борта имеет свой спектр механических свойств. Эти свойства могут

изменяться, как по толщине поверхности, так и по ее площади. Сегодня можно говорить о существовании принципиально новой конструкции корпуса судна из композитов, наилучшим образом использующей некоторые положительные качества этого типа материалов, представляющей собой многослойную оболочку. Оболочковые конструкции из композиционных материалов являются одним из наиболее перспективных современных видов конструкций, осваиваемых мировым малотоннажным судостроением. Эти конструкции позволяют добиваться высокой весовой эффективности в сочетании с необходимыми механическими характеристиками. Одним из ключевых вопросов проектирования судовых корпусных конструкций из композитов является обеспечение их прочности и долговечности в заданных условиях эксплуатации.

В соответствии с принципами строительной механики корабля, обеспечение прочности представляет собой сложную систему взаимодействующих между собой подсистем: нагрузки, размеров, формы конструкции и конструкционных материалов. В рамках взаимодействия этих подсистем существует целый ряд классификаций, например: внешних сил, напряжений, условий, приводящих к разрушению. На этой основе, как правило, назначаются критические пределы, а также нормы допускаемых напряжений, в соответствии с системой нормирования прочности.

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

Известно, что в корпусах судов из композитов в процессе эксплуатации возникают дефекты различного характера, в первую очередь, внутренние дефекты типа расслоение. Наблюдение за процессами развития таких дефектов с помощью различных методов неразрушающего контроля дает возможность в режиме реального времени оценить изменения механических свойств элементов судового корпуса из композитов в процессе эксплуатации.

Развитие дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению ее прочностных качеств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. Наличие внутренних дефектов обуславливает снижение прочности элемента корпусной конструкции, в первую очередь за счет снижения физико-механических свойств композита. Кроме того, оно повышает вероятность разрушения элемента конструкции. Степень влияния дефекта, в первую очередь, определяется его видом, размером, местоположением, а также условиями работы композита.

Разработка норм проектной годности судовых корпусной конструкции из композита, при условии существования в ней эксплуатационных дефектов,

тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности разрушения.

Выявление и изучение влияния различных эксплуатационных факторов на развитие внутренних дефектов типа трещин и расслоений, а также самой динамики их развития, дает ключ к оценке надежности и долговечности корпусных судовых корпусных конструкций из композитов. Исследование динамики развития дефектов позволяет достоверно оценивать изменение технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации, прогнозировать изменение его эксплуатационной прочности в течение всего срока службы и, в конечном итоге, делать выводы о долговечности конструкции в целом. Проектные рекомендации, разработанные на базе этой информации, позволяют совершенствовать процесс разработки корпусных конструкций из композитов.

В отечественной науке, к настоящему времени, выполнен комплекс исследований, посвященный изучению различных аспектов механики композиционных материалов, в том числе, содержащих различные внутренние дефекты в виде трещин и расслоений, а также обеспечения характеристик прочности и долговечности многослойных конструкций из композитов, в том числе, содержащих эксплуатационные дефекты типа расслоение. Здесь необходимо упомянуть работы таких ученых, как А.В. Александров, С.А. Амбарцумян, В.В. Болотин, Л.А. Бохоева, В.В. Васильев, А. С. Вольмир, А.М. Душин, В.А. Л.М. Качанов, Киреев, В.Т. Лизин, В.В. Пяткин, А.Н. Полилов, И.Ф. Образцов, С.П. Тимошенко, Ю.М. Тарнопольский, Е.П. Толстобров, Г.П. Черепанов и ряд других. Необходимо упомянуть, также, работы зарубежных исследователей, таких как, М. Дзако, Дж. Купер, М. Пигготт, Н. Пэйгано, Т. Фудзии, Х.Хан, С. Цай и ряда других.

### **Особенности восприятия композитом нагрузок, действующих на корпус глиссирующего судна.**

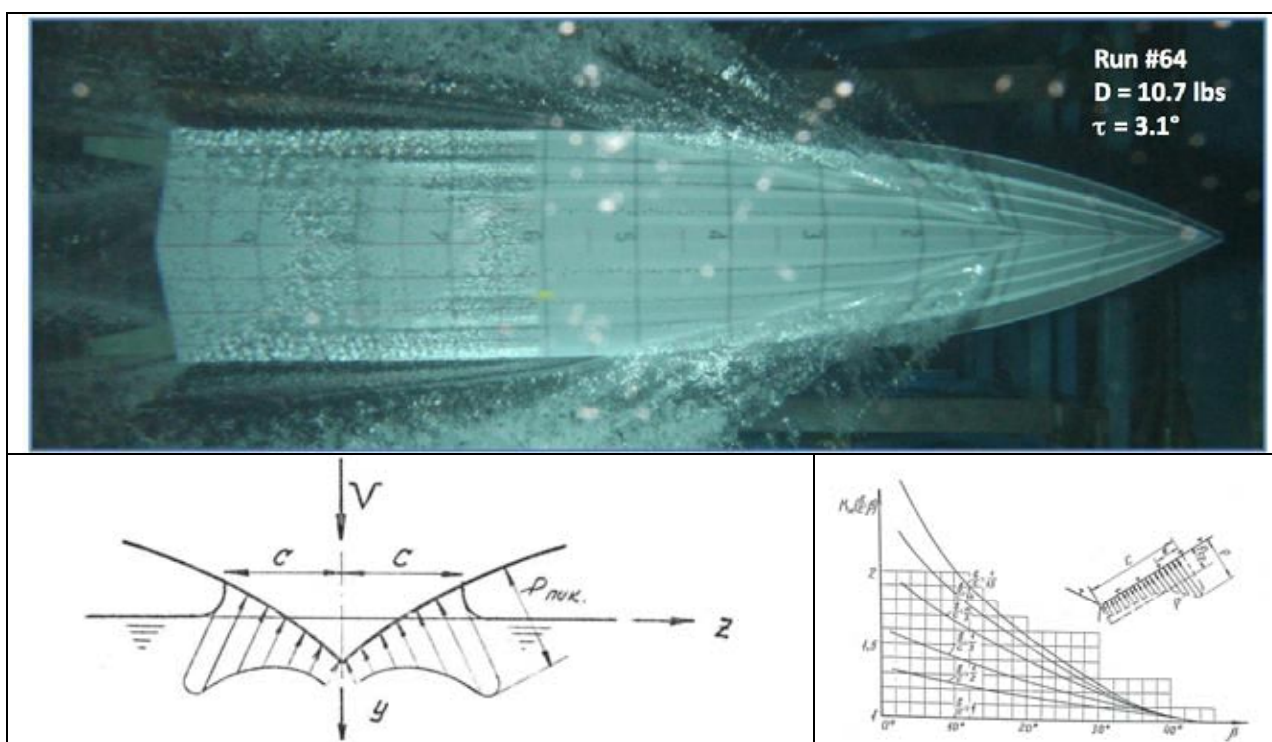
При движении глиссирующего судна в расчетном режиме по поверхности воды на его корпусные конструкции действуют две основные группы гидродинамических нагрузок:

- гидродинамические нагрузки, обусловленные режимом прямолинейного движения по поверхности воды с большой скоростью;
- гидродинамические нагрузки, обусловленные продольными, поперечными и вертикальными колебаниями корпуса судна относительно поверхности воды.

Гидродинамические давления, действующие на погруженные конструкции корпуса глиссирующего судна, распределяются по площади погруженной части корпуса неравномерно. При движении судна с большими скоростями, существует перепад давлений в поперечном направлении его корпуса при переходе от днища к свободной поверхности. Существование перепада давлений вызывает интенсивное растекание воды поперек днища, причем у

борта (скулы) вода выбрасывается в виде струй и брызг. Максимальные «пиковые» давления возникают по границам смоченной поверхности, где жидкость вытесняется с наибольшей скоростью.

В дополнение к неравномерности распределения давлений на днищевом перекрытии глессирующего судна, на его борту, в районе границы раздела сред возникают зоны кавитации. Явление кавитации представляет собой образование в водном потоке кавитационных каверн - разрывов сплошности среды в виде отдельных полостей, наполненных водяными парами, давление в которых снижается до давления насыщенного пара. В месте замыкания кавитационной каверны происходят гидравлические удары, которые вызывают механическое разрушение материала. Кавитация – одна из основных причин эрозионного разрушения композита типа стеклопластика. Низкая кавитационная стойкость характерна для всех стеклопластиков.

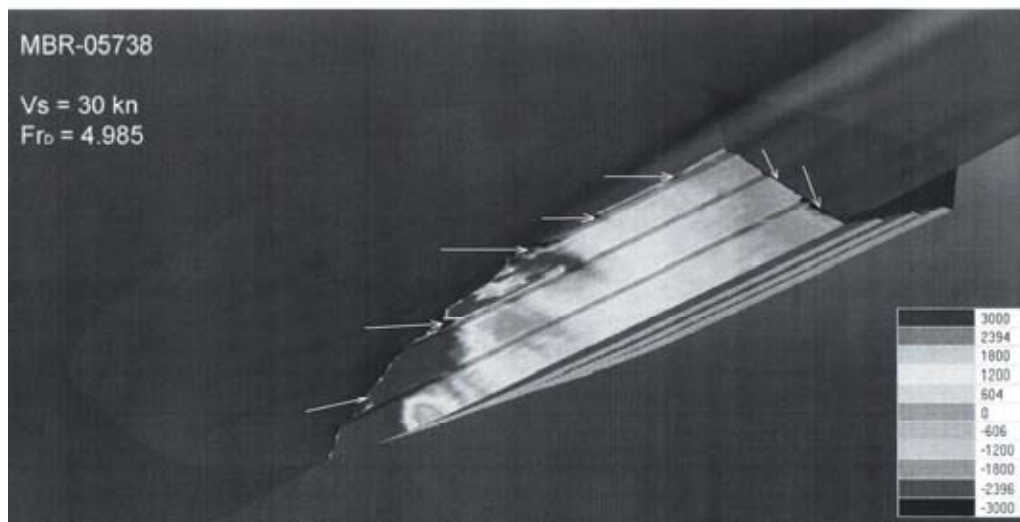


**Рис. 2. Схема брызгообразования и неравномерность распределения давления на днищевом перекрытии при движении глессирующего судна график изменения коэффициента, учитывающего неравномерность распределения давления по днищу глессирующего судна в зависимости от килеватости.**

Изменение коэффициента, учитывающего неравномерность распределения давлений по смоченной ширине днища, используемого в расчетах внешних нагрузок, приведено на графике (рис. 2 снизу справа) в зависимости от угла килеватости  $\beta$ .

На рис. 3. представлена модель распределения динамического давления по поверхности погруженной части корпуса катера в виде одной из картин

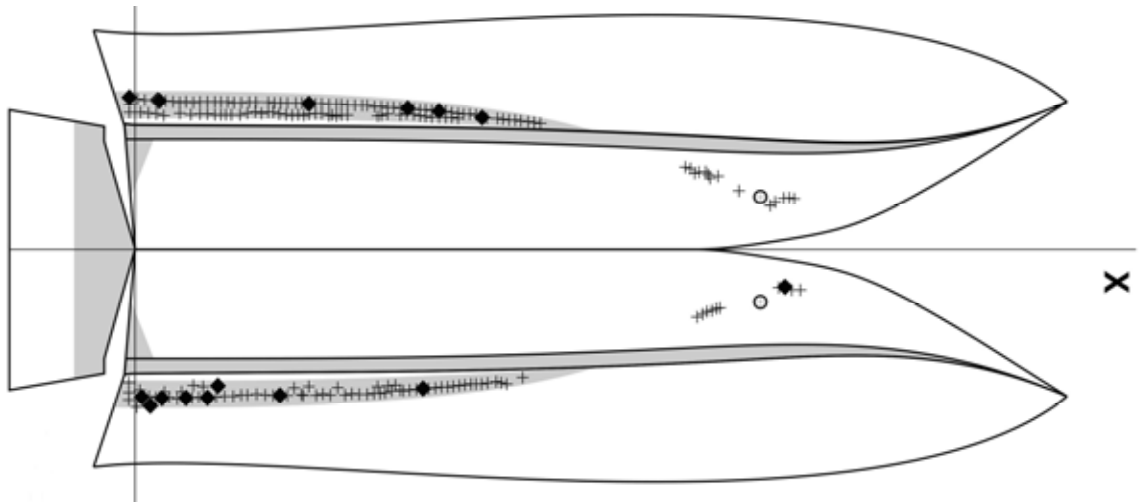
визуализации физических процессов при выполнении расчета буксировочного сопротивления скоростного глиссирующего катера, имеющего обводы типа глубокое «V» численными методами. На модели распределения стрелками обозначены зоны возможного возникновения кавитации.



**Рис. 3. Распределение динамического давления по поверхности погруженной части корпуса катера полученное расчетом. Стрелками обозначены зоны вероятного возникновения кавитации.**

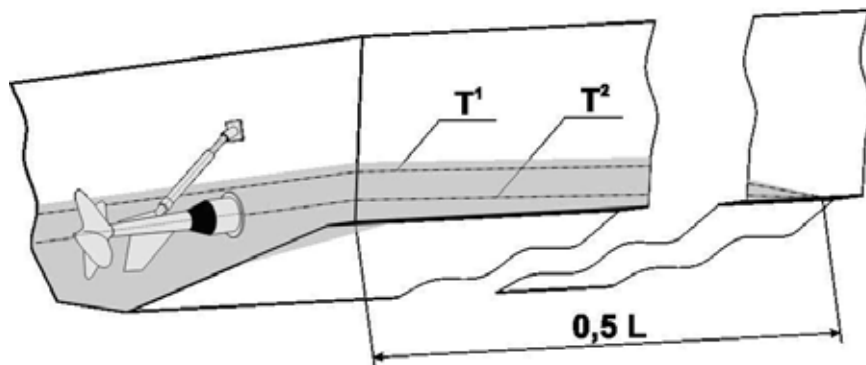
Представленная модель распределения давлений на погруженной части корпуса судна не содержит информации о поле давлений, формируемом его движительным комплексом. Учитывая сложность согласования полей давлений корпуса и движителя численными методами, целесообразно, для получения достоверных результатов воздействия давлений от движителя на поверхность корпуса производить исследования реальных корпусов судов методами неразрушающего контроля.

В течение шести лет выполнен комплекс работ по исследованию корпусов судов из композиционных материалов возрастом старше пяти лет, находящихся в эксплуатации под техническим наблюдением Московского филиала Российского Речного Регистра. Методами неразрушающего контроля исследовано более 130 корпусов судов из композиционных материалов длиной до 27 м. Эта работа сопровождалась аналитической и методической обработкой полученных результатов. При исследовании методами неразрушающего контроля корпусов глиссирующих судов изготовленных из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации пять лет и более, как правило, внутренние дефекты типа расслоение с наибольшей частотой и в наибольшем количестве обнаруживаются в наружной обшивке корпуса в районе переменной ватерлинии. Пример расположения таких дефектов приведен на рис. 4.



**Рис. 4. Схема расположения дефектов типа расслоение, выявленных методами неразрушающего контроля, на корпусе глиссирующего судна с ЧПГВ**

На рис. 5 представлено распределение зоны дефектов типа расслоение на корпусе судна с ЧПГВ, полученное методами неразрушающего контроля, вероятной причиной возникновения которых может являться кавитация, возникающая в потоке, обтекающем корпус к движителю.



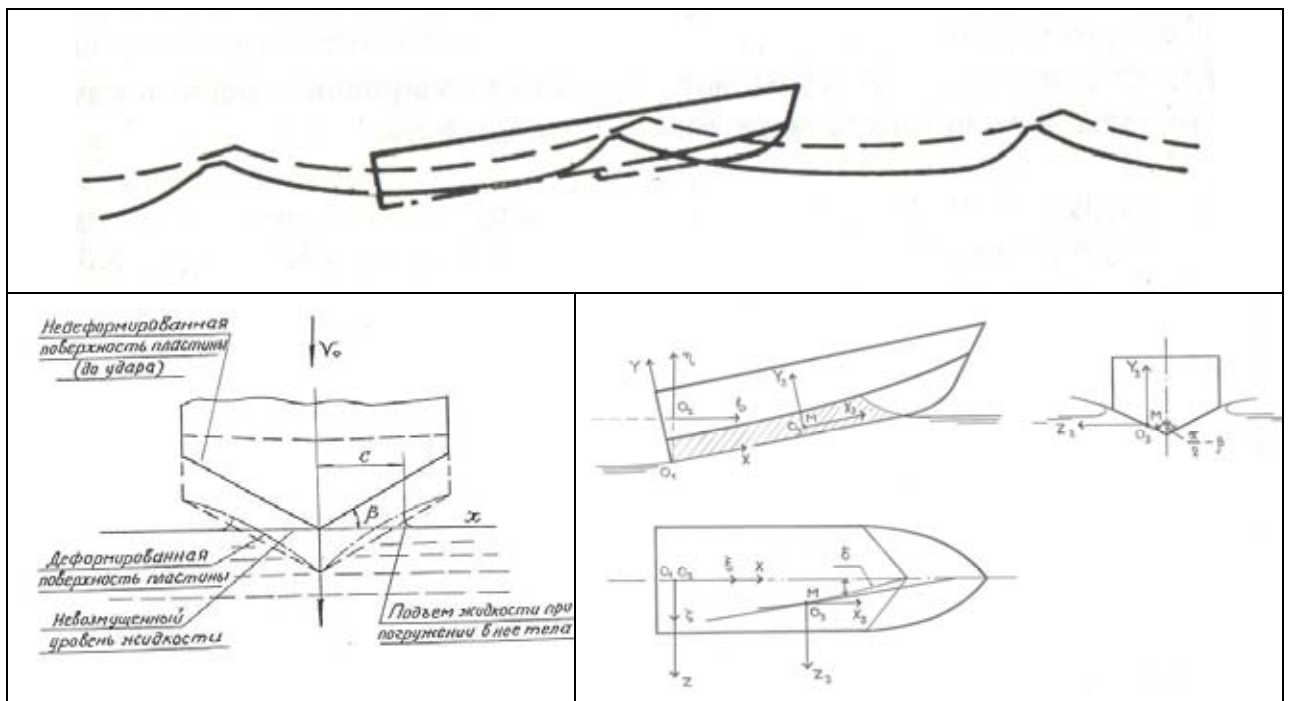
**Рис. 5. Распределение зоны внутренних дефектов типа расслоение на корпусе судна с ЧПГВ, вероятной причиной возникновения которых может являться кавитация.**

Существенно более редкое скопление меньшего количества дефектов фиксируется в других местах погруженной части корпуса. Размеры, площади и концентрация дефектов увеличиваются с увеличением ресурса использования судна. Таким образом, обнаруженные в районе переменной ватерлинии на поверхности корпусов судов из композиционных материалов внутренние дефекты типа расслоение являются следствием действия гидродинамических нагрузок. Эти нагрузки действуют на днищевые конструкции корпуса глиссирующего судна. При этом зоны дефектов распределяются по площади погруженной части корпуса неравномерно, в наибольшей степени возникают по границам смоченной поверхности корпуса.

При движении в условиях волнения, которое существует на реальных водоемах практически всегда, судно испытывает продольную качку. При плавании судна на волнении отдельные точки корпуса описывают траектории, напоминающие синусоиды. (См. рис. 6 вверху). Частота вынужденных колебаний, совершаемых идущим навстречу волне судном при этом, будет равна

$$\omega = \frac{2\pi u}{\lambda_B} \quad (1)$$

где,  $u = C_v + C_k$  – относительная горизонтальная скорость судна,  $C_v \approx 1,25\sqrt{\lambda v}$  – скорость волны,  $C_k$  – скорость судна,  $\lambda v$  – длина волны.



**Рис. 6. Движение глиссирующего корпуса на волне и схема деформации днищевого перекрытия при движении**

С увеличением скорости хода периодичность перемещений корпуса все более нарушается и, начиная с некоторого момента, они приобретают неупорядоченный характер. В результате действия на корпус ударных гидродинамических сил при движении на волнении он получает вынужденные вертикальные колебания, которые являются суммой перемещений, соответствующих всем формам главных свободных колебаний. Проявляющиеся в результате взаимодействия элементов корпуса с взволнованной поверхностью воды динамические нагрузки могут достигать значительных величин. При действии распределенной поперечной нагрузки на перекрытие, обладающее килеватой формой, возникают деформации в

собственной плоскости участков этого перекрытия, ограниченной килевой линией и бортами. Одновременно пластины обшивки с поперечным набором подвергаются действию в средней части перекрытия сжимающих усилий, а у поперечных переборок и транца – растягивающих усилий. Кроме того, наблюдается значительное возрастание касательных усилий, приложенных к поперечным переборкам. Схема деформации килевого перекрытия приведена на рис. 6 внизу слева. Следы воздействия таких усилий, передающихся с днищевое перекрытия и погруженной части обшивки борта на остальные элементы корпуса, проявляются в виде внутренних дефектов типа расслоение в местах примыкания поперечных переборок к обшивке днища и борта, в ряде мест надводного борта, а также в местах примыкания фундаментов главных двигателей к обшивке днища.



**Рис. 7. Расположение дефектов эксплуатационной природы на корпусе судна из композиционных материалов.**

Обобщенная схема расположения наиболее нагруженных и уязвимых элементов судна из композиционных материалов, использующая результаты обследований более чем 130 корпусов судов из композиционных материалов, приведена на рис. 7.



## **Зависимость концентрации эксплуатационных дефектов на корпусе глиссирующего судна от характеристик его энерговооруженности и ресурса использования.**

Оценочные расчеты прочности судовых конструкций из композитов, ее прогнозирование и нормирование, базирующиеся на эмпирических подходах и непосредственном увязывании расчетных коэффициентов запаса прочности с результатами целенаправленно поставленных экспериментов 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 композиционных материалов в жидкостях, в том числе, связанного с изменением температуры, что характерно, например, для наружной обшивки корпуса глиссирующего судна, создает принципиальные затруднения в разработке методов ускоренных динамических испытаний, воспроизводящих реальные условия.

Исследование разрушений, связанных с действием на судовые конструкции из композитов интенсивных импульсных нагрузок, должно развиваться в нескольких направлениях. Наряду с совершенствованием техники натурного эксперимента, расширением исследований по разработке моделей поведения композиционных материалов в условиях интенсивных ударных нагрузок, а также повышением роли численного эксперимента, необходима регистрация степени поврежденности материала в зоне разрушения конструкций в разных натуральных опытах, в первую очередь, элементов реальных судов в эксплуатации.

В зависимости от интенсивности напряжений в композите, такая регистрация дает информацию о кинетике и характере развития процесса разрушения, что, в конечном итоге, позволяет определить уровни нагружения, соответствующие зарождению повреждений на микроскопическом уровне. Такие исследования, позволяют фактически обнаружить и оценить процессы разрушения в композиционных материалах, проходящие задолго до их окончательного разрушения.

Наблюдение с помощью различных методов неразрушающего контроля процессов развития внутренних дефектов в виде микротрещин и расслоений дает возможность оценки изменения механических свойств композиционных материалов в процессе эксплуатации. Это может позволить выдвинуть ряд новых теорий и критериев прочности, основанных на концепции накопления повреждений.

Исследования, направленные на регистрацию степени поврежденности композиционного материала в зоне разрушения, в сочетании с численными экспериментами и моделированием при помощи вычислительной техники динамических эффектов, сопутствующих разрушению матричной и армирующей фаз композита, позволяют глубже понять качественное многообразие ситуаций, возникающих при накоплении повреждений в композите на микроструктурном уровне. Выявление динамических эффектов

и исследование их влияния на развитие разрушения композиционных материалов приобретает особое значение при разработке структурных моделей композитов и имитации на ЭВМ взаимодействия отдельных разрушений на микроскопическом уровне.

Поэтому, кроме традиционного подхода, базирующегося на представлении о существовании некоторого критического, порогового значения прочности, после достижения которого, наступает мгновенное разрушение материала, актуален другой подход к трактовке явления прочности. В рамках этого подхода разрушение представляется процессом неравновесным и в большинстве случаев нестационарным. Это – кинетический подход. Разрушение, в этом случае, представляет собой необратимый кинетический процесс накопления внутренней повреждаемости материала. При этом становится очевидной заметно выраженная зависимость прочности элемента из композитов от продолжительности воздействия нагрузки и режима нагружения.

Для корректного учета воздействия всех факторов, оказывающих влияние на работоспособность судовых корпусных конструкций из композиционных материалов, необходимо в прогнозную расчетную схему внести предположения о накоплении повреждений в материале конструкций в процессе эксплуатации. Необходимо исследовать зависимости процесса накопления повреждений от уровня, длительности и характера изменения во времени силовых и других эксплуатационных воздействий.

При изучении воздействия гидродинамических давлений на поверхность корпуса судна из композитов особенный интерес, представляют исследования процессов разрушения композита при действии интенсивных импульсных нагрузок. Большинство существующих моделей динамического разрушения исходят из тех же положений, что и модели квазистатического разрушения. Методы динамического разрушения базируются на предположении о непрерывном характере роста трещин. Экспериментальные данные, однако, показывают дискретный характер роста трещины, что особенно ярко проявляется при циклическом нагружении. Важным вопросом является исследование реакции композитов на высокоскоростное ударное нагружение, перпендикулярное плоскости армирования при их динамическом разрушении. Такое нагружение характерно для локального пика гидродинамического давления, проявляющегося, например, в процессе кавитации. Результирующее разрушение зависит от многих факторов, таких, как геометрия элемента, скорость удара, свойства исходных материалов, образующих композит и многое другое. Внутренние дефекты в виде растрескивания, разрушения волокон, а также образования локальных расслоений — это, лишь некоторые из возможных способов разрушения.

Законченной теории разрушения композиционных материалов при действии интенсивных импульсных нагрузок пока не существует. Результаты проведенных исследований демонстрируют сложный характер этого разрушения. В то же время, выяснены многие детали этого физического явления, в том числе на микроуровне. Получены важные сведения для

предсказания возможности образования разрушений, разработаны численные многостадийные модели описания этих явлений. Известно, что величина разрушающего напряжения композиционных материалов при действии интенсивных импульсных нагрузок зависит от формы и длительности импульса растягивающих напряжений, напряженно-деформированного состояния, ряда физических и технологических факторов. Прочность при таком виде нагрузок представляет собой функцию многих переменных.

При практической эксплуатации судовые конструкции из композитов подвергаются действию самых различных нагрузок, меняющихся во времени. Поэтому применительно к конструкционным жестким композиционным материалам 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.

Использование различных гипотез суммирования повреждений, простейшей из которых является линейный закон, предложенный Р. Робинсоном и Д. Бейли, может оказаться приближенно верным для механизма разрушения объединяющего статические и динамические нагрузки. Он может позволить по уравнению долговечности рассчитать время до разрушения конструкции при любом временном режиме нагружения, в том числе и при циклическом.

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

$$\int_0^t \frac{dt}{t(\sigma)} = 1 \quad (2)$$

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

Особенности разрушения композитов, связанные с многообразием ситуаций, возникающих на структурном уровне армирующих элементов (дробление волокон, расслоение по границам компонентов, растрескивание матрицы), требуют создания специализированных структурных моделей материалов. В то же время, имеющиеся математические модели микронеоднородных сред пока не в состоянии достаточно полно учесть многообразие реальных механизмов разрушения на микроуровне. При их применении значительная часть экспериментальной информации об отдельных особенностях разрушений в композитах на микроуровне, сопровождающихся накоплением повреждений остается без эффективного использования.

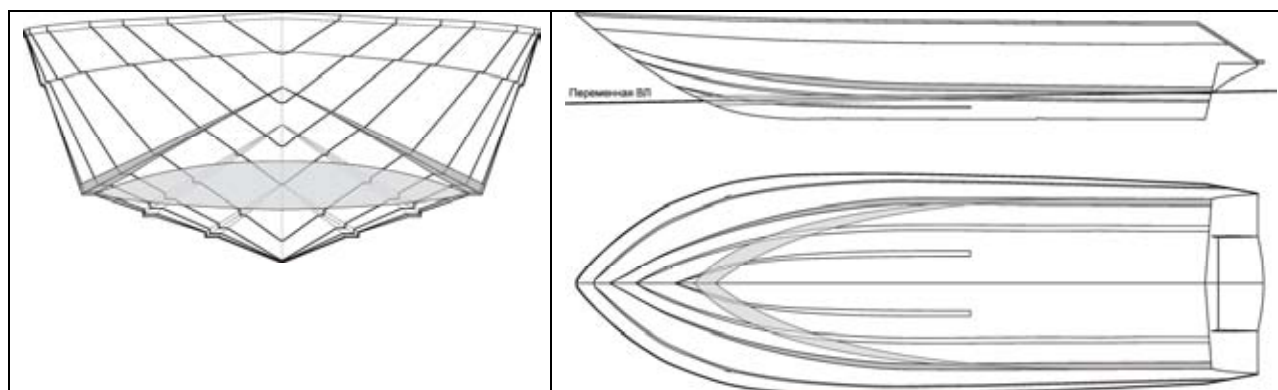
Принципы возникновения внутренних дефектов типа расслоение, их форм и места расположения на корпусе, а также систематическое их обнаружение в больших количествах в строго определенных местах открывают путь к разработке количественных методов определения их

взаимосвязи с режимами нагружения, связанными с характеристиками полной массы, мощности и скорости судна, их продолжительностью и интенсивностью. Обработка полученных данных методами регрессионного анализа позволяет получить 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 судам одного проекта, имеющим различный ресурс использования в достаточно больших количествах.

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, предложенной И.Г. Бубновым, 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 на основании базы данных судов из композитов, прошедших операцию дефектоскопии в 2007-2010 годах. В качестве одной из определяющих характеристик выбрана энерговооруженность судна, представляющая собой отношение суммарной установленной мощности главных двигателей к полной массе судна. В качестве второй характеристики принят ресурс времени эксплуатации корпуса судна из композиционных материалов. Он определяется по счетчикам моточасов главных двигателей. В качестве третьей обобщающей характеристики принят интегральный ресурс использования, определяемый произведением энерговооруженности на время эксплуатации.

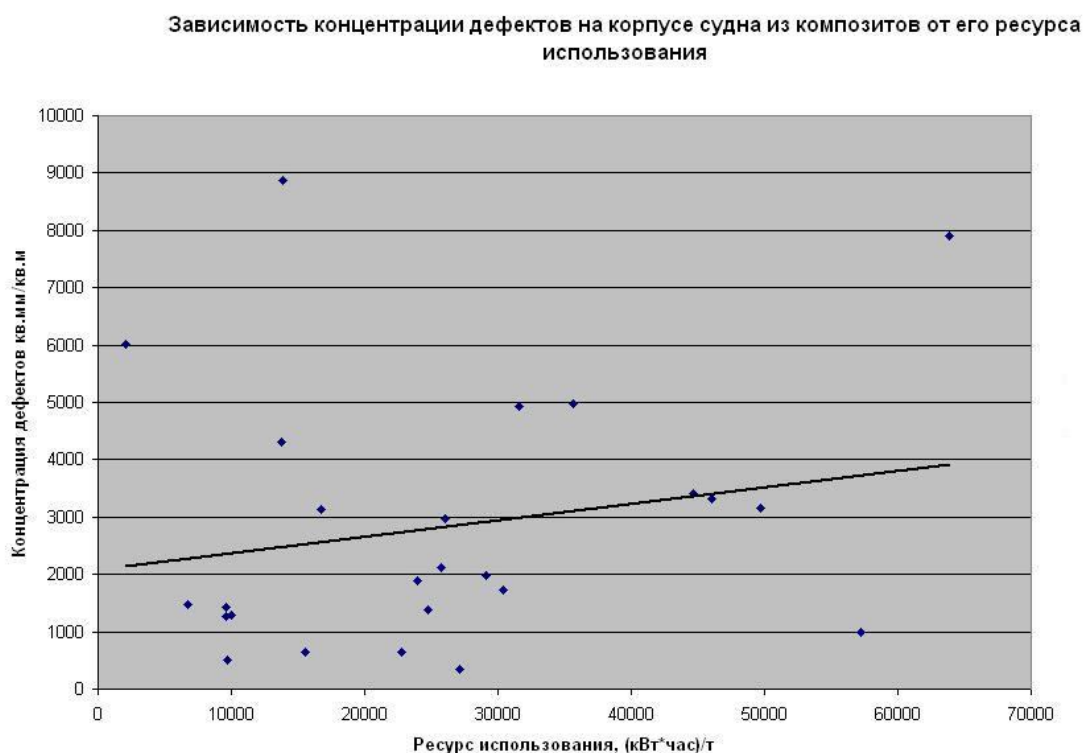
При расчете определялось суммарное количество и площади дефектов на каждом из корпусов, а также отношение площади поверхности обшивки корпуса, подвергшейся разрушению, к общей площади поверхности обшивки в исследуемом районе (концентрация дефектов).



**Рис. 8. Расположение на корпусе глиссирующего судна зон высокой концентрации дефектов.**

В соответствии с критерием Бейли, для анализа выбраны расслоения, вызванные действиями пиковых давлений, расположенные на поверхности корпуса в районе переменной ватерлинии пятном, напоминающим по своей конфигурации ленту. (См. рис. 8) Средней линией этой ленты приближенно является линия пересечения поверхности корпуса с поверхностью воды, т.е. действующая ватерлиния. Все расслоения, обнаруженные на корпусе в районе переменной ватерлинии, при исследовании были зафиксированы в паспорте освидетельствования судна из композитов с указанием площади и количества. Полученные значения величины коэффициента концентрации аппроксимированы по линейному закону. (См. рис. 9)

В связи с тем, что среди обследованных судов количество судов одного проекта мало, полученные количественные зависимости для анализа характеристик прочности и долговечности непригодны. Однако они подтверждают качественную взаимосвязь между концентрацией внутренних дефектов типа расслоение и эксплуатационными характеристиками судна из композитов, что тоже немаловажно.



**Рис. 9. Зависимость концентрации дефектов от интегральной величины в виде произведения энерговооруженности и ресурса использования корпуса ( $N/D * t$ )**

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. Расчет также подтверждает существование взаимосвязи между

эксплуатационными характеристиками судна из композитов в виде энерговооруженности и различных форм ресурса использования и концентрацией дефектов. Таким образом, прогнозирование изменения характеристик прочности и долговечности корпуса судна из композитов может рассматриваться, как расчет значений функции на определенном интервале:

$$K = f(t) \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент концентрации расслоений;

$t$  – ресурс использования корпуса.

Для получения формализованных зависимостей, позволяющих анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов, требуется обработка данных методами регрессионного анализа по достаточно большому количеству судов из композитов одного проекта и близких лет выпуска.

### **Модель разрушения композита в зоне эксплуатационных дефектов.**

Динамическое импульсное воздействие на корпусную конструкцию, имеющую достаточную прочность, по всей видимости, сопровождается локальным изгибом перекрытия в месте контакта. При этом одни слои конструкции оказываются растянутыми, а другие сжатыми. В этот момент на границе слоев возникают касательные напряжения между отдельными слоями конструкции из композита, приводящие к нарушению адгезионных связей между ними, которые и являются непосредственной причиной возникновения внутренних дефектов типа расслоение.

При растяжении слоистых композитов сначала происходит продольное растрескивание композита, начинающееся с матрицы, которое инициирует разрушение армирующих волокон. Продольная трещина проходит не строго вдоль них, но и перерезает часть из них. Образованная поверхность играет роль дефекта. Группы перерезанных волокон могут отслоиться, в результате чего появляется вторичная продольная трещина, и появляются новые перерезанные волокна. Как следствие, происходит лавинообразное рассыпание материала на мелкие фрагменты. Считается, что отслоение развивается, когда растягивающее напряжение  $\sigma$  достигает порогового значения  $\sigma_c$ . При этом исходная трещина поворачивает на 90 град. и начинает расти вдоль волокон. Таким образом, имеется конкуренция двух процессов – роста трещины поперек и вдоль волокон. [1]

В различных работах, в том числе в [1], рассмотрены задачи растрескивания при растяжении волокнистого композита вблизи начального несовершенства в виде отверстия. При этом критическое напряжение  $\sigma_c$  рассчитывается по критерию Гриффитса, в котором в качестве предельного размера дефекта используется величина диаметра отверстия.

Как было сказано выше, внутренние дефекты корпусных конструкций из композитов по своей природе имеют случайный характер возникновения. Взаимосвязь между частотой возникновения внутренних дефектов типа расслоение, их количеством и размерами, а также продолжительностью и интенсивностью эксплуатации судна на качественном уровне понятна. В то же время в связи с большим разнообразием армирующих и связующих исходных компонентов композиционных материалов, а также многообразия конструктивных решений, для получения каких-либо аналитических зависимостей необходим очень большой объем исследований.

В результате анализа различных аспектов механики композиционных материалов установлены следующие особенности разрушения слоистых композитов элементов судовых корпусов:

- в начальной стадии дефект локализуется в относительно малом объеме на уровне структуры композита, образуя микроповреждение;
- макроскопическое разрушение происходит в плоскости раздела слоев и направление развития дефекта задается расположением слоев.
- рост расслоения имеет циклический характер и состоит из периодов субравновесного состояния, инкубационной стадии, в течение которой происходит накопление микроповреждений на фронте расслоения и его скачкообразного роста до нового субравновесного состояния.

В качестве базовой схемы разрушения слоистых композитов судовой корпусной конструкции может рассматриваться схема, учитывающая взаимодействие между процессом накопления микроповреждений и финальным разрушением, которая имеет три возможных варианта развития:

- разрушение путем потери целостности, вследствие достижения критического значения плотности микроповреждений;
- образование сочетания дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые станут зародышами макроскопических трещин с их дальнейшим ростом;
- хрупкое разрушение, как завершение процесса накопления микроповреждений.

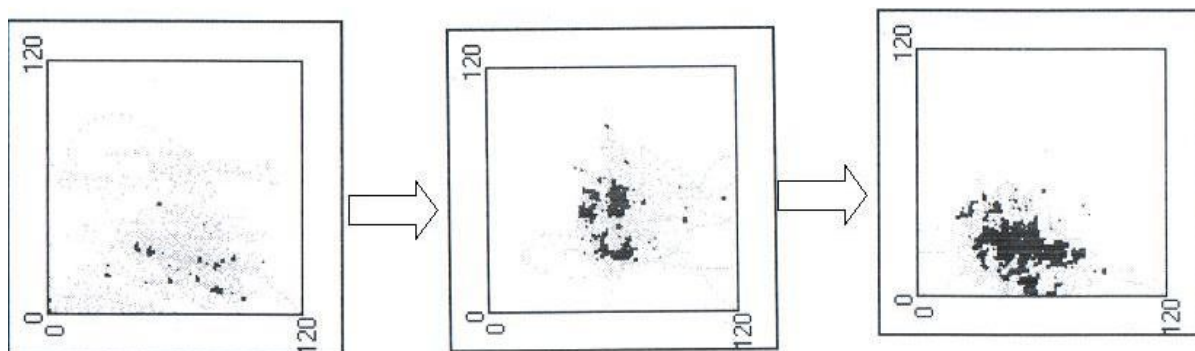
В качестве основной модели разрушения судовой корпусной конструкции из композиционных материалов, которая находит подтверждение в соответствующих источниках, может быть принята модель, имеющая следующие особенности:

- первичные микроповреждения композита вызваны ударными нагрузками;
- происходит образование сочетания дефектов в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры, которые становятся зародышами макроскопических трещин (см. рис.10);
- скорость накопления микроповреждений зависит от локальных напряжений;
- характер роста макроскопического дефекта зависит от распределения микроповреждений в окрестности его фронта;

- при изгибе пластины корпуса происходит ее дальнейшее продольное растрескивание в плоскости раздела слоев;
- прочность пластины из композита уменьшается с увеличением отношения размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины, при этом прочность пластины с дефектом зависит не только от площади расслоения, но и его размеров в плане;
- влияние дефектов типа расслоение на прочность оболочки корректно учитывается за счет уменьшения изгибной жесткости пакета слоев в локальной зоне расслоения;
- уменьшенная изгибная жесткость рассчитывается, как суммарная жесткость независимо работающих слоев уменьшенной толщины, на которые разделяется пакет слоев;
- устойчивость элемента конструкции, содержащей дефект типа расслоение, в докритической и закритической стадии должна рассматриваться только для элементов судового корпуса, устойчивость которых проверяется при новом проектировании;
- на устойчивость пластины, содержащей дефект типа расслоение, влияет отношения размеров дефекта типа расслоение к размерам пластины, при этом устойчивость пластины с дефектом зависит не только от площади расслоения, но и его размеров в плане и толщины отслоившейся части;
- влияние учёта эффектов поперечного сдвига на оценку устойчивости элемента судовой конструкции из композитов производится только для судовых конструкций, имеющих большую толщину отслоившейся части;
- рост расслоения имеет циклический характер и состоит из периодов субравновесного состояния, относительно непродолжительной инкубационной стадии накопления микрповреждений на фронте формирования расслоения, после которой происходит его скачкообразный рост за счет объединения микрповреждений на фронте до перехода макроскопического дефекта в мало поврежденную область матричной прослойки;
- усталостное поведение конструкции из композита, содержащей дефект типа расслоение, в большой степени зависит от типа и схемы армирования, при этом композиты на базе армирующих материалов в виде тканей демонстрируют повышенную усталостную прочность по отношению к композитам армированных матами;
- для описания поведения композита при разрушении корректно применима трехкомпонентная схема разрушения композита, учитывающая три моды разрушения: отрыв, продольный и поперечный сдвиги;
- модель учитывает влияние нормальных напряжений на удельную работу разрушения при сдвиге;
- удельная работа разрушения композита не зависит от моды;



- достижение напряжением по любой из мод критических значений свидетельствует о достижении дефектом предельных размеров.



**Рис. 10. Развитие дефекта из микрповреждений (изображения получены методами неразрушающего контроля)**

Таким образом, под критерием эксплуатационной прочности и долговечности корпуса судна, изготовленного из композитов, находящегося в эксплуатации, с учетом возникших в процессе эксплуатации внутренних дефектов типа расслоение, может пониматься оценка изменений его прочностных свойств, в виде изменения расчетных напряжений, а также повышения вероятности разрушения.

### **Определение степени утраты прочностных свойств и вероятности разрушения судовой корпусной конструкции из композита.**

Предельно допустимые величины геометрических параметров внутренних дефектов типа расслоение, существующих в конструкции, определяются с учетом гарантии ее целостности или практической неизменяемости формы конструкции в течение всего срока эксплуатации. Они оцениваются с позиции обеспечения прочности конструкции, устойчивости, жесткости и долговечности (ресурса). Предельная величина утраты прочностных свойств конструкции определяется достижением геометрических параметров дефектов типа расслоение таких величин, при наличии которых уровень действующих в конструкции напряжений превышает предельно допустимый уровень, установленный нормами проектирования. В качестве опасных напряжений принимаются пределы прочности стеклопластика при сжатии, растяжении и сдвиге, уменьшенные в соответствии с ожидаемым влиянием эксплуатационных факторов, либо эйлеровы напряжения связи, определенные с учетом сдвига. Назначение опасных напряжений для судовых конструкций из композиционных материалов производится дифференцировано, в зависимости от условий работы той или иной связи. Нормы опасных напряжений учитывают длительность и характер действия нагрузки, а также изменение работоспособности конструкций с различным армированием в зависимости от этих факторов.

Оценка изменения прочностных свойств представляет собой сопоставление прочностных свойств конструкции, рассчитанных в соответствии с действующими нормами проектирования для нового корпуса, и прочностных свойств той же конструкции, рассчитанных с учетом наличия в ней дефектов типа расслоение, возникших в процессе эксплуатации и имеющих определенные геометрические параметры. Она производится одновременно двумя способами: путем вычисления нормальных расчётных 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 композита для данной связи корпуса; подстановки измеренной прибором величины площади дефекта в формулу Гриффитса или в формулу Ирвина и вычисления при помощи этих формул значения величины критического напряжения, в предположении, что размер дефекта данной площади является критическим. В случае если величина полученного критического напряжения превышает предельно допустимое значение напряжения, вычисленное с учетом старения композита для данной связи корпуса, размер дефекта превышает предельно допустимое значение.

Ниже, в качестве примера, приводятся примеры расчетных моделей разработанных на основании с учетом конструктивных узлов, схем армирования и примененных технологических процессов формования корпусных конструкций глиссирующего судна по технической документации ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс»:

- Килевая зона (200 мм на каждый борт от линии киля) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Скуловая зона (250 мм выше и ниже от линии скулы) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Обшивка днища между реданами – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Борт без подкреплений – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Палуба без подкреплений – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Примыкание днища к транцу (500 мм в нос от линии примыкания) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- Борт в районе подкреплений – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким наполнителем;
- Палуба в районе подкреплений – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким наполнителем;
- Транец – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с жестким на растяжение средним слоем.

В указанных моделях учитывается анизотропия материала по изложенной выше схеме. Слой конструкции, полученный методом напыления, рассматривается, как изотропный. Поверхности обшивки корпуса

рассматриваются, 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 зигах, (реданы, декоративные зиги бортов и т.п.)

Напряжения в абсолютно жесткой пластине определяются как:

$$\sigma^i = \frac{M_{изг}^i E_{np} (z - z_0)}{D^i} \quad (4)$$

где  $M_{изг}$  - 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, как:

$$E_{np} = [E_v E_n]^{1/2} \quad (5)$$

Где,  $E_v$ ,  $E_n$  - модули упругости соответственно верхнего и нижнего слоев.

Цилиндрическая жесткость на изгиб для двухслойной пластины в соответствии с [79] определяется как:

$$D = \frac{E_v \delta_v^3}{12(1-\nu_v^2)} + \frac{E_v \delta_v}{1-\nu_v^2} (\delta_n + \frac{\delta_v}{2} - z_0)^2 + \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_n \delta_n}{1-\nu_n^2} (z_0 - \frac{\delta_n}{2})^2 \quad (6)$$

где  $\delta_v$ ,  $\delta_n$  - толщина соответственно верхнего и нижнего слоев;

$\nu_v$ ,  $\nu_n$  - коэффициенты Пуассона соответственно верхнего и нижнего слоев;

Цилиндрическая жесткость на изгиб для трехслойной несимметричной пластины с легким наполнителем определяется как:

$$D = \frac{E_v \delta_v^3}{12(1-\nu_v^2)} + \frac{E_v \delta_v}{1-\nu_v^2} (H - z_0 - \frac{\delta_v}{2})^2 + \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_n \delta_n}{1-\nu_n^2} (z_0 - \frac{\delta_n}{2})^2 \quad (7)$$

где  $H$  – высота сечения пластины [79].

Цилиндрическая жесткость на изгиб для трехслойной несимметричной пластины с жестким на растяжение средним слоем соответствии с [79] определяется как:

$$D = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}^2} \left(H - z_0 - \frac{\delta_{\epsilon}}{2}\right)^2 +$$

$$+ \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_n \delta_n}{1-\nu_n^2} \left(z_0 - \frac{\delta_n}{2}\right)^2 + \frac{E_{cp} \delta_{cp}^3}{12(1-\nu_{cp}^2)} +$$

$$\frac{E \delta_{cp}}{1-\nu_{cp}^2} \left(\delta_n + \frac{\delta_{cp}}{2} - z_0\right)^2 \quad (8)$$

Где,  $E_{cp}$ , – модуль упругости среднего слоя.

$\delta_{cp}$ , – толщина среднего слоя;

$\nu_{cp}$ , – коэффициент Пуассона среднего слоя.

Цилиндрическая жесткость на изгиб для расслоившейся двухслойной пластины соответствии с [79] определяется как:

$$D_{рас} = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} \quad (9)$$

Цилиндрическая жесткость на изгиб для расслоившейся трехслойной несимметричной пластины с легким наполнителем [79] определяется как:

$$D_{рас} = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} \quad (10)$$

Цилиндрическая жесткость на изгиб для расслоившейся трехслойной несимметричной пластины с жестким на растяжение средним слоем соответствии с [79] определяется как:

$$D_{рас} = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n \delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_{cp} \delta_{cp}^3}{12(1-\nu_{cp}^2)} \quad (11)$$

В соответствии с [83] цилиндрическая жесткость на изгиб для двухслойной пластины в соответствии с может быть представлена как:

$$D = D_{рас} + \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}^2} \left(\delta_n + \frac{\delta_{\epsilon}}{2} - z_0\right)^2 + \frac{E_n \delta_n}{1-\nu_n^2} \left(z_0 - \frac{\delta_n}{2}\right)^2 \quad (12)$$

Отношение напряжений в районе зоны расслоения и целом материале может быть представлено, как:

$$\frac{\sigma_{рас}^i}{\sigma^i} = \frac{M_{usz}^i E_{np} (z - z_0)}{D_{рас}^i} \frac{D^i}{M_{usz}^i E_{np}^i (z - z_0)} = \frac{D^i}{D_{рас}^i} \quad (13)$$

Напряжение в зоне расслоений всегда больше напряжений в целом материале, поэтому данная дробь больше единицы, и она может быть представлена, как:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{рас}^i}{\sigma^i} &= \frac{\sigma^i + \Delta\sigma}{\sigma^i} = 1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma^i} = \\ &= \frac{D^i}{D_{рас}^i} = \frac{D_{рас}^i + \Delta D}{D_{рас}^i} = 1 + \frac{\Delta D}{D_{рас}^i} \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда:

$$1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma^i} = 1 + \frac{\Delta D}{D_{рас}^i} \quad (15)$$

Следовательно:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma^i} = \frac{\Delta D}{D_{рас}^i} \quad (16)$$

В соответствии с (20):

$$\Delta D = \frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1 - \nu_{\epsilon}^2} \left( \delta_{н} + \frac{\delta_{\epsilon}}{2} - z_0 \right)^2 + \frac{E_{н} \delta_{н}}{1 - \nu_{н}^2} \left( z_0 - \frac{\delta_{н}}{2} \right)^2 \quad (17)$$

Тогда для двухслойной пластины отношение прироста напряжений вызванного возникновением расслоения к величине напряжения действующего в целом материале может быть определено по формуле:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}{1 - \nu_{\epsilon}^2} \left( \delta_{н} + \frac{\delta_{\epsilon}}{2} - z_0 \right)^2 + \frac{E_{н} \delta_{н}}{1 - \nu_{н}^2} \left( z_0 - \frac{\delta_{н}}{2} \right)^2}{\frac{E_{\epsilon} \delta_{\epsilon}^3}{12(1 - \nu^2)} + \frac{E_{н} \delta_{н}^3}{12(1 - \nu^2)}} \quad (18)$$

С точки зрения физики, слагаемые, стоящие в числителе дроби, представляют собой величину дополнительной жесткости, обусловленной адгезионными связями между слоями, исчезающую при возникновении расслоений. Аналогичным образом могут быть определены отношения прироста напряжений к действующим напряжениям для расслоившейся трехслойной несимметричной пластины с легким наполнителем:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\frac{E_{\epsilon}\delta_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}^2}(\delta_n + \frac{\delta_{\epsilon}}{2} - z_0)^2 + \frac{E_n\delta_n}{1-\nu_n^2}(z_0 - \frac{\delta_n}{2})^2}{\frac{E_{\epsilon}\delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n\delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)}} \quad (19)$$

и для расслоившейся трехслойной несимметричной пластины с жестким на растяжение средним слоем:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = & \frac{\frac{E_{\epsilon}\delta_{\epsilon}}{1-\nu_{\epsilon}^2}(H - z_0 - \frac{\delta_{\epsilon}}{2})^2 + \frac{E_n\delta_n}{1-\nu_n^2}(z_0 - \frac{\delta_n}{2})^2}{\frac{E_{\epsilon}\delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n\delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_{cp}\delta_{cp}^3}{12(1-\nu_{cp}^2)}} + \\ & + \frac{\frac{E\delta_{cp}}{1-\nu_{cp}^2}(\delta_n + \frac{\delta_{cp}}{2} - z_0)^2}{\frac{E_{\epsilon}\delta_{\epsilon}^3}{12(1-\nu_{\epsilon}^2)} + \frac{E_n\delta_n^3}{12(1-\nu_n^2)} + \frac{E_{cp}\delta_{cp}^3}{12(1-\nu_{cp}^2)}} \quad (20) \end{aligned}$$

Таким образом, степень влияния дефекта типа расслоение на изменение механических характеристик элемента корпуса судна, изготовленного из композитов, при изгибе оценивается ростом напряжений, вызванных действием изгибающего момента, в зоне расслоения по отношению к целому участку за счет снижения цилиндрической жесткости на изгиб.

Анизотропность пластины в плане учитывается за счет использования в расчетных формулах приведенных модуля упругости и коэффициента Пуассона, представляющих собой среднее геометрическое произведения этих физических величин, определенных по направлениям армирования.

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

$$L = (S_D)^{1/2} \quad (21)$$

где,  $S_D$  – площадь дефекта;

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

$$\sigma_c = \left[ \frac{\gamma E_{np}}{\pi (S_D)^{1/2} (1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (22)$$

Формула расчета критического напряжения с использованием критерия Ирвина примет вид:

$$\sigma_c = K_c \left[ \frac{1}{\pi (S_D)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (23)$$

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

$$\sigma_{рас}^i \leq \sigma_0 \quad (24)$$

Условие нераспространения дефекта может быть записано, как:

$$\sigma_{рас}^i \leq \sigma_c \quad (25)$$

или в развернутом виде с учетом критерия Гриффитса:

$$\sigma_{рас}^i = \frac{M_{изг}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D_{рас}^i} \leq \sigma_c = \left[ \frac{\gamma E_{np}}{\pi (S_D)^{1/2} (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (26)$$

или в развернутом виде с учетом критерия Ирвина:

$$\sigma_{рас}^i = \frac{M_{изг}^i E_{np}^i (z - z_0)}{D_{рас}^i} \leq \sigma_c = K_c \left[ \frac{1}{\pi (S_D)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (27)$$

Величины  $\gamma$  или  $K_c$ , определяемые экспериментальным путем, принимаются по справочной литературе. В случае невыполнения условия (26, 27) 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, и слои композита перестают каким-либо образом взаимодействовать друг с другом. Благодаря наличию этих спаек расчетные формулы обеспечивают запас в безопасную сторону и, опираясь на выполненный расчет, предъявляется требование ремонта корпусной конструкции, когда до ее разрушения еще далеко.

## Заключение

В докладе описано эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок, включающее следующие аспекты:

- обоснование причины возникновения внутренних дефектов типа расслоения, являющихся следствием воздействия на корпус из композитов гидродинамических нагрузок, а также обобщенную схему их расположения на корпусе;
- методику учета концентрации внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационного характера на корпусе судна во взаимосвязи с

характеристиками полной массы, мощности и ресурса использования корпуса;

- модель разрушения композиционного материала в зоне развития внутреннего дефекта типа расслоение эксплуатационной природы возникновения;
- способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации, использующий результаты исследования методами неразрушающего контроля, защищенный патентом РФ № 2354964 от 16.10.2007 года

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов С.Л. и др. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010, 354 с.
2. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М: Машиностроение, - 2003 – 447 с.
3. Межслойные эффекты в композитных материалах, под ред. Пэйгано Н. пер. с англ. под ред. Ю.М. Тарнопольского, М, Мир, 1993, 347 с.
4. Францев М.Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов, Морской вестник № 4(28), 2008, стр. 93 – 98.
5. Францев М.Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов, Конструкции из композиционных материалов, № 3, 2011, стр. 86-97
6. Францев М.Э. Способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации, Контроль. Диагностика, № 11, 2009. стр. 61-68
7. Frantsev M. E., The mode used for the estimation of the technical condition for the boat hull from composite materials for exploitation, 10-th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, June 7-11, 2010, Abstracts, part 2, p. 64
8. Frantsev M. E. The project's recommendation for definition of the most loaded and vulnerable elements of boat hull from composites which based on results of survey by methods of non-destructive testing., World Maritime Technology Conference, Saint-Petersburg 29 May – 1June, 2012, Abstracts of papers, p. 31
9. Черепанов Г.П. Механика разрушения многослойных оболочек. Теория трещин расслаивания. Прикладная математика и механика. 1983. Т. 47. Вып. 5. С. 832 – 845.



## Аннотация

Описано эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок. Обоснованы причины возникновения внутренних дефектов типа расслоения, являющихся следствием воздействия на корпус из композитов гидродинамических нагрузок. Приведена обобщенную схему расположения дефектов эксплуатационного характера на корпусе. Выполнен расчет концентрации внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационного характера на корпусе судна во взаимосвязи с характеристиками полной массы, мощности и ресурса использования корпуса. Предложена модель разрушения композиционного материала в зоне развития внутреннего дефекта типа расслоение эксплуатационной природы возникновения. Изложен способ оценки технического состояния корпуса судна из композитов в процессе эксплуатации, использующий результаты исследования методами неразрушающего контроля, защищенный патентом РФ № 2354964 от 16.10.2007 года

## Abstract

The report is about the behaviour of boat hull from composite materials under the action of hydrodynamic loads during exploitation. The reasons of emergence of internal defects type delamination in composites are justified as a result of exposure hydrodynamic loads to boat hull. There is the generalized scheme of location of internal defects type delamination for exploitation on boat hull. There is the calculation of the concentration of internal defects type delamination for exploitation on boat hull in relation to the characteristics of the total mass, power, and resource of boat. There is the model of the destruction of the composite material in the area of internal defects type delamination for exploitation. There is the mode used for the estimation of the technical condition for the boat hull from composite materials for exploitation, has been patented RF № 2354964 from 16.10.2007