

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА ПРИ СОЗДАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СУДОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ

Инжиниринговая компания «Нептун-Судомонтаж»

В статье рассмотрены основные вопросы, касающиеся методики внедрения армирующих материалов на основе базальтового волокна в продукцию отечественного судостроения. Рассмотрены особенности конструкции корпуса судов из композитов. Рассмотрены особенности эксплуатационного поведения корпуса судна из композитов. Выполнен сравнительный анализ характеристик стеклянного и базальтового армирующих волокон. Описан способ определения технического состояния корпусов судов из композитов в процессе эксплуатации путем их исследования методами неразрушающего контроля. Описаны основные мероприятия, предшествующие сертификации базальтового волокна по Правилам отечественных Классификационных обществ. Определена область судостроения, где целесообразно использование композитов на основе базальтовых армирующих волокон.

Ключевые слова: базальт, стекло, армирующие материалы, композиты, суда, конструкция, прочность, эксплуатационное поведение.

Введение

Современный этап развития судостроения характеризуется все более широким применением композитов для корпусов судов различного назначения. Известно, что применение в конструкции корпуса композитов судна позволяет значительно сократить сроки строительства по сравнению с традиционными материалами. Кроме того, оно допускает использование существенно менее квалифицированной и более дешевой рабочей силы, чем та, которая требуется для постройки судов из традиционных материалов. Все это обуславливает серьезную экономическую мотивацию массовой постройки судов из композитов. Поэтому сегодня большую часть мирового малотоннажного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композитов. Например, только в Японии в эксплуатации находится более трехсот тысяч промысловых судов из полимерных композитов различных типов.

Применение композитов позволяет создавать суда с высокими аэро- и гидродинамическими характеристиками, с легкими надстройками, эффектным дизайном внешнего облика и рядом других достоинств. Известно, что конструкция судовых корпусов из композитов, по мере накопления опыта проектирования, строительства и эксплуатации судов из этих материалов, стала существенно отличаться от конструкции корпусов судов, изготовленных из традиционных материалов, особенно, в скоростном малотоннажном судостроении.

Композиты представляют собой материалы, состоящие из двух фаз: армирующего волокна и матрицы, создаваемой на базе органического связующего. Сегодня во всем мире базальтовое волокно рассматривается в качестве перспективного материала, в том числе, армирующего материала для композитного судостроения.

В то же время, суда, к настоящему времени изготовленные из композитов, армированных базальтовым волокном (рис. 1), в большинстве, представляют собой лишь демонстраторы технологий. В силу ограниченных геометрических размеров они не требуют сложного проектирования и имеют упрощенную конструкцию корпуса. Поэтому опыт их постройки мало что дает для исследования всего круга вопросов, связанного с внедрением базальтового волокна в качестве армирующего материала композитного судостроения. В данной статье предпринята попытка исследовать этот круг вопросов более подробно.

Постановка задачи

В соответствии с принципами строительной механики корабля, обеспечение прочности корпуса судна из композитов представляет собой сложную систему взаимодействующих между собой подсистем: нагрузки, размеров, формы конструкции и собственно композита. В рамках взаимодействия этих подсистем существует целый ряд классификаций, например: внешних сил, напряжений, а также условий, приводящих к разрушению. На этой основе, как правило, назначаются критические пределы, а также нормы допускаемых напряжений, в соответствии с системой нормирования прочности. На базе этих критических пределов и норм разрабатываются методики проектирования судов из композитов, которые впоследствии апробируются и верифицируются различными способами в процессе эксплуатации этих судов.

Корпус современного судна из композитов, в том числе, скоростного судна, представляет собой многослойную оболочку. Оболочковые конструкции из композитов являются одним из наиболее перспективных современных видов конструкций, осваиваемых мировым малотоннажным судостроением, наилучшим образом использующими некоторые положительные качества этого типа материалов. Эти конструкции позволяют добиваться высокой весовой эффективности в сочетании с необходимыми механическими характеристиками. Одним из центральных вопросов проектирования судовых корпусных конструкций из композитов является обеспечение их прочности и долговечности в заданных условиях эксплуатации.

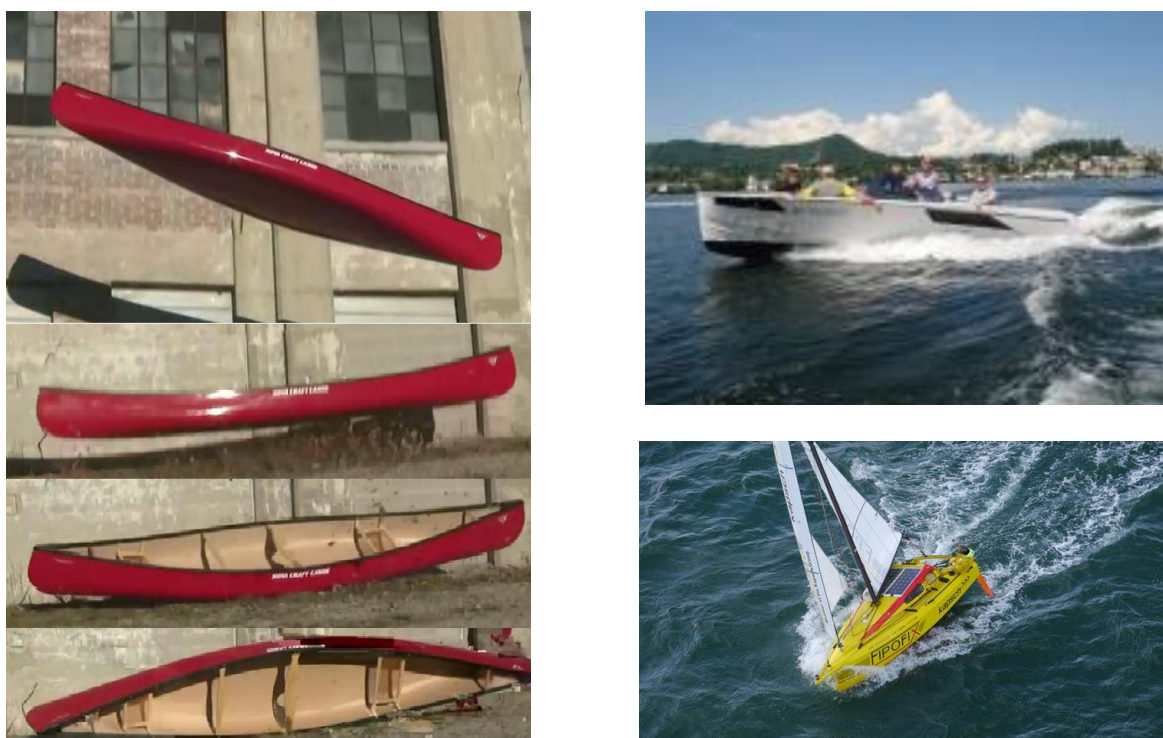


Рис. 1. Суда, изготовленные из композитов, армированных базальтовым волокном – демонстраторы технологий

Многослойная оболочка судового корпуса – это объемно-прочная конструкция, состоящая из двух основных элементов: собственно корпуса и палубы. Корпус судна без палубы и палуба без корпуса не обладают достаточной прочностью и жесткостью. Они приобретают необходимую прочность после соединения в единое целое. Продольные и поперечные переборки устанавливаются между ними и обеспечивают сохранение формы. Каждая из поверхностей корпуса и палубы судна имеет свой набор механических характеристик, которые изменяются по всей поверхности, как по длине корпуса, так и по толщине обшивки. В состав

судовых корпусных конструкций из композитов входят элементы из вспененных структур. В комбинации с закладными деталями и подкрепляющими элементами корпус судна из композитов представляет собой конструкцию, способную эффективно воспринимать эксплуатационные нагрузки. Элементы корпусных конструкций из композитов формируются из большого количества слоев малой толщины. В состав армирующих материалов, формирующих судовой композит, наряду со стеклом могут входить волокна на основе углерода, а также органические волокна. Каждый слой композита обладает собственным набором механических свойств, изменяющихся по направлению, в зависимости от ориентации волокон в слое.

Современное модельное представление об армирующей и матричной фазах композита также включает граничный слой, который находится между ними. Этот граничный слой и определяет механические характеристики композита за счет того, что внутри него находятся поверхностные дефекты армирующей фазы композита, которые способствуют снижению его прочности, примерно, на два порядка по отношению к расчетным значениям. Проектирование крупного элемента судовой корпусной конструкции из композитов представляет собой триединую задачу, включающую проектирование собственно конструкции элемента, проектирование технологии изготовления ее основных элементов, а также проектирование композиционного материала для конструкции на базе определенных исходных материалов, выбор которых определяется экономической целесообразностью. При разработке конструкции из полимерных композитов достигается компромисс между эффектом сложения свойств полимерного материала со свойствами армирующих волокон и термодинамической совместимостью матрицы и волокна.

Основным связующим, применяемым в судостроении являются полиэфирные смолы. Существенно меньше используются эпоксидные смолы. Определенное развитие в последние годы получило использование в судостроении винилэфирных смол. Независимо от вида связующего и природы армирующего волокна, адгезия органической смолы к волокну и пропитываемость смолой волокон являются самыми важными качествами, характеризующими сочетание этих материалов в качестве основы для производства композита.

Использование различных технологий изготовления судовых корпусных конструкций из композита сопровождается появлением технологических дефектов типа расслоение (непроклей), которые влекут за собой снижение характеристик прочности. В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа расслоение как технологической, так и эксплуатационной природы.

Решение

Наиболее распространенными армирующими волокнами, применяемыми в современном судостроении, являются стеклянные волокна. Стекловолокно обладает редким сочетанием свойств: высокой прочностью при растяжении и сжатии, негорючестью, термостойкостью, достаточно малой гигроскопичностью, стойкостью к химическому и биологическому воздействию. Основную часть стеклянных волокон получают из бесщелочного алюмосиликатного стекла состава «Е», а также из магний-алюмосиликатного стекла «S», отличающегося более высоким модулем упругости и прочностью.

Таблица 1.

Механические характеристики армирующих волокон, применяемых в судостроении

Вид волокна	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
Арамидные	3,00-3,60	60,0-180,0
Углеродные	2,50-7,00	200,0-600,0
Стеклянные	2,50-4,50	70,0-90,0
Базальтовые	3,00-4,80	95,0-110,0

Рассмотрев табл. 1, в которой приведены механические характеристики различных армирующих материалов для судостроения, а также базальтовых волокон, можно увидеть,

что механические характеристики базальтового волокна ближе всего стеклянному волокну. Выполненные исследования [1-17] показывают, что базальтовые волокна обладают почти такими же характеристиками, как S-2 стекловолокна, а по цене находятся между S-2 стеклом и E-стеклом. При этом не было обнаружено значительных расхождений в показателях жесткости и прочности между композитами на основе полимера, армированного базальтовым волокном, и стекловолоконным композитом, армированным тканью схожего ткацкого рисунка. Снижение показателя прочности на разрыв у композита, изготовленного на основе рубленого мата из базальтового волокна, по сравнению с композитами, армированными тканым материалом сатинового плетения, составило около 48%, а прочности на изгиб – около 30%, что примерно соответствует показателям композитов, изготовленных на основе стеклянных матов. Таким образом, базальт и стекло в области судостроения являются конкурирующими материалами [1-17].

Анализ результатов исследований [1-17], позволил выявить область преимуществ базальтового волокна перед стеклянными волокнами. В таблице 2 выполнен сравнительный анализ качеств стеклянного и базальтового армирующих волокон. В частности, установлено, что коррозионная стойкость базальтовых волокон в воде существенно выше, чем у волокон из E-стекла. Несмотря на то, что результаты некоторых опытов с состариванием композитов указывают, что границы раздела фаз базальтовых композитов могут быть более уязвимы к воздействию негативных факторов окружающей среды, чем у стекловолоконных композитов, тем не менее, установлено, что граница между базальтовым волокном и эпоксидной смолой может быть более прочной, чем граница между стекловолоконным и эпоксидной смолой, что показал эксперимент на усталость при растяжении, потому что усталостная прочность у базальтовых композитов выше [1-17].

Таблица 2.

Сравнительный анализ качеств стеклянного и базальтового армирующих волокон

Свойства	Базальтовое волокно	Стекловолоконное волокно
Температура применения, С	(-)260 до (+)900	(-)60 до (+)450
Коэффициент теплопроводности, Вт/м ²	0,031 – 0,038	0,034 – 0,04
Диаметр элементарного волокна, мкм	7 – 17	6 – 17
Плотность, кг/м ³	2600 – 2800	2540 – 2600
Модуль упругости, кг/мм ²	9100 – 11000	До 7200
Остаточная прочность при растяжении (термообработки), %		
при 20°С	100	100
при 200°С	95	92
Гигроскопичность, %	0,2 – 0,5	7 – 20
Химическая устойчивость грубого волокна (потеря веса в %, после 3-х часового кипения) в Н ₂ О	1,6	6,2

Необходимо отметить, что подавляющее большинство исследований механических характеристик композитов на основе базальтового волокна было выполнено для материалов на основе эпоксидных смол [1-17].

Установлено, что полимерные композиты на основе стеклянных и базальтовых волокон имеют сходную устойчивость к удару, кроме того их послеударные остаточные свойства не сильно отличаются, с небольшим преимуществом композитов, армированных базальтовым волокном. Основное различие заключается в наличии более протяженной области расслаивания стекловолоконных (E-стекло) слоистых материалов, по сравнению с армированными базальтовыми волокнами. При этом базальтовое волокно является перспективным материалом в качестве армирующей добавки. Оно имеет относительно более высокую, чем стекло, прочность на разрыв, поэтому гибридизация композита базальтовыми волокнами

способствует увеличению поглощения энергии удара за счет усиления распространения в нем трещин [4]. Таким образом, рассмотрев всю совокупность свойств этих армирующих материалов можно увидеть, что базальтовые волокна имеют существенное преимущество перед стеклянными волокнами в области прочности и температурной стойкости, а также гигроскопичности и химической устойчивости к воздействию воды. Поэтому базальтовые волокна способны заменить Е-стекло в некоторых судостроительных композитах, особенно там, где требуется устойчивость к экстремальным условиям. Как было сказано выше, наиболее распространенными армирующими волокнами, применяемыми в современном судостроении, являются стеклянные волокна. Армирующие материалы из стекловолокна, применяемые в судостроении, имеют следующие формы:

- ровинг;
- стекломат (включая поликор-маты);
- стеклоткань (включая мультиаксиальные ткани);
- стеклорогожа.

В настоящее время из непрерывного базальтового волокна производятся следующие материалы, которые теоретически могут использоваться в качестве армирующих материалов для судостроительных композитов:

- ровинг;
- ровинговые ткани;
- ткани из крученой нити;
- сетки армирующие;
- маты и тонкие маты (базальтовая бумага).

Как можно видеть, совпадение с армирующими материалами для судостроения, производимыми на основе стеклянных волокон, достаточно большое. В то же время, внедрение базальтового волокна будет сдерживаться отсутствием форм армирующих материалов, к которым судостроители уже успели привыкнуть типа мультиаксиальных тканей, а также различных форм специализированных матов. К настоящему времени накоплен огромный опыт изготовления судовых корпусных конструкций из композитов на основе стеклянных волокон с помощью различных технологических процессов. Как правило, процесс изготовления судовых корпусных конструкций из непрерывно армированных полимерных композиционных материалов совпадает с процессом получения самого композита. Наибольшее практическое применение в отечественном судостроении находят следующие способы производства изделий из армированных композитов:

- контактное формование с укладкой пропитанного смолой волокнистого армирующего материала на форму;
- напыление волокнисто-полимерной композиции на поверхность формы;
- различные способы формования в закрытой форме с использованием вакуума.

Известно, что использование различных технологий изготовления судовых корпусных конструкций из композита на базе стеклянных волокон сопровождается появлением технологических дефектов типа расслоение (непроклей), которые влекут за собой снижение характеристик прочности. В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа расслоение как технологической, так и эксплуатационной природы. Доминирующими факторами эксплуатации, влияющими на эксплуатационное поведение композита судового корпуса, являются:

- воздействие гидродинамических нагрузок;
- воздействие воды, как органического растворителя;
- воздействие сочетания низких и высоких температур;
- воздействие солнечной радиации (ультрафиолет);
- аварийные повреждения.

В соответствии с практикой, сложившейся в мировом судоходстве, одним из достоверных критериев определения технического состояния корпуса судна является выявление и учет имеющихся в нем различных эксплуатационных дефектов и износов. Развитие эксплуа-

тационных дефектов в корпусной конструкции ведет к снижению ее прочностных качеств и способности противостоять неблагоприятным эксплуатационным воздействиям. Для корпусов судов, изготовленных из традиционных материалов, величина дефекта или износа определяется, как правило, по изменению геометрических размеров поперечного сечения связей корпуса и связанных с ними механических характеристик (площади сечения, момента инерции сечения, момента сопротивления сечения). По достижении определенных размеров дефекта или износа, напряжения, действующие в конструкции в районе его расположения, превышают пределы прочности, установленные проектантом и изготовителем судна, в качестве предельно допустимых. Это может привести, как к разрушению конструкции при расчетных режимах движения, так и к непропорциональному увеличению зоны аварийных разрушений при нештатных эксплуатационных ситуациях. Такие корпуса получают оценку ограниченной годности, а в дальнейшем – непригодности к эксплуатации.

В процессе эксплуатации на судна из композитов действуют различные эксплуатационные нагрузки. Природа, характер и продолжительность воздействия этих нагрузок на корпус судна из композитов целиком и полностью идентичны аналогичным параметрам эксплуатационных нагрузок, действующим на корпуса судов, изготовленных из традиционных материалов. В то же время, эксплуатационное поведение элементов корпуса из композитов существенно отличается от эксплуатационного поведения корпусов судов из традиционных материалов. В связи с этим при проектировании судовых конструкций из композитов проблемы их прочности и долговечности занимают центральное место [18].

Специфическим видом реагирования композита на основе стеклянных волокон на воздействие воды, как органического растворителя, является осмос судовых корпусов из композитов. Известно, что осмос протекает на молекулярном уровне и развивается в виде трех основных стадий. Проявления осмоса в финальной стадии представляют собой внутренние дефекты типа расслоение.

Известно, что под влиянием доминирующих факторов эксплуатации композит судового корпуса на основе стеклянных волокон не изменяет своего внешнего вида и размеров при эксплуатации в течение многих лет. Но в композите возникают и развиваются внутренние дефекты типа расслоение. Композит, содержащий эти дефекты, внешне мало отличается от нового материала. Анализ изменения геометрических размеров сечения судовой корпусной конструкции из композита на основе стеклянных волокон в процессе эксплуатации не имеет смысла.

Дефекты эксплуатационной природы могут быть выявлены, как внешним осмотром, так и различными методами неразрушающего контроля, которые применяются в отечественном судостроении много лет. Наблюдение с помощью инструментов неразрушающего контроля за развитием внутренних дефектов в композите позволяет выдвинуть ряд новых теорий и критериев его прочности, в том числе, основанных на концепции накопления повреждений. Такие исследования открывают путь к разработке количественных методов определения взаимосвязи их концентрации и мест расположения с режимами нагружения, связанными с характеристиками полной массы, мощности и скорости судна, их продолжительностью и интенсивностью. Обработка полученных данных методами численного анализа позволяет получить формализованные зависимости. Эти зависимости в дальнейшем могут позволить анализировать и прогнозировать изменение характеристик долговечности корпусов судов из композитов. Проектные рекомендации, разработанные на базе этой информации, уже сейчас позволяют совершенствовать процесс разработки корпусных конструкций из композитов [18].

Разработка норм проектной годности судовой корпусной конструкции из композита, имеющей эксплуатационные дефекты, тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности ее разрушения.

Выявление и изучение влияния различных эксплуатационных факторов на работоспособность конструкции, а также самой динамики их развития, дает ключ к оценке надежности и долговечности 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. Наблюдение за процессами развития 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, а также позволяет получить объективную информацию об изменении технического состояния корпуса в процессе эксплуатации [19-21].



БАЗАЛЬТ	СТЕКЛО
КОНСТРУКЦИЯ	КОНСТРУКЦИЯ
ПРОЧНОСТЬ	ПРОЧНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИЯ	ТЕХНОЛОГИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ	ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ
СЕРТИФИКАЦИЯ	НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Рис. 2. Схема внедрения армирующих материалов на основе базальтового волокна

Для определения технического состояния корпусов судов из композитов на основе стеклянного волокна была разработана «Временная методика исследования корпусов судов с динамическим способом поддержания (гладящих) методами неразрушающего контроля с целью выявления дефектов типа расслоение», которая была утверждена Российским Речным Регистром письмом № 07-01.9-153 от 24.01.07 г. На базе Московского филиала Российского Речного Регистра в 2007-2015 годах были выполнены исследования корпусов судов из композитов. При этом применялся запатентованный способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композитов, находящегося в эксплуатации, с использованием методов неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов, измерением их площади и сравнением ее величины с предельно допустимым значением. Методами неразрушающего контроля исследовано более 135 корпусов судов из композитов длиной до 27 м, мощностью главных двигателей до 4000 кВт, имеющих скорость полного хода до 40 узлов. Эти суда эксплуатировались, в среднем, не более 200 часов в год, или не более 1000 часов за пять лет. При дефектоскопии корпуса судна в возрасте от пяти лет методами неразрушающего контроля обнаруживается в среднем до 200-300 участков корпуса, содержащих внутренние дефекты типа расслоение различных размеров. Также был выполнен ряд экспертиз для судебных органов и арбитража.

Выполненная работа сопровождалась аналитической и методической обработкой полученных результатов. Было проанализировано расположение дефектов эксплуатационной природы на корпусе судна из композитов. Были проанализированы следы воздействия на

корпуса из композитов нагрузок от общего изгиба и скручивания, а также от локальных нагрузок, изгибающих днищевое перекрытие. Эти следы в виде внутренних дефектов типа расслоение обнаруживаются в местах примыкания к наружной обшивке продольных и поперечных переборок, фундаментов и пр. Была составлена обобщенная схема расположения на корпусе судна из композитов внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационной природы [19-21].

Выводы

Учитывая изложенное выше, для успешного внедрения базальтовых волокон в качестве армирующих материалов для композитного судостроения необходимо вписать их в сложившиеся проектно-технологический и эксплуатационный комплексы судостроительных задач. Поэтому в рамках процесса внедрения армирующих материалов на основе базальтового волокна в продукцию отечественного судостроения необходимо решить следующие вопросы:

- изучить отличия механических характеристик судовых корпусных конструкций из композитов на основе базальтового волокна в композиции с полиэфирными, эпоксидными и винилэфирными смолами, особенно для трехслойных конструкций от аналогичных механических характеристик композитов на основе стеклянного волокна.
- изучить отличия технологических процессов создания судовых корпусных конструкций из композитов на основе базальтового волокна в композиции с полиэфирными, эпоксидными и винилэфирными смолами от аналогичных технологических процессов по созданию конструкций на основе стеклянного волокна, включая экономическую сторону вопроса.
- изучить отличия эксплуатационного поведения судовых корпусных конструкций из композитов на основе базальтового волокна в композиции с полиэфирными, эпоксидными и винилэфирными смолами от эксплуатационного поведения аналогичных конструкций на основе стеклянного волокна.

Применение базальтовых волокон в качестве армирующих материалов для судостроения потребует их сертификации в соответствии с нормативными документами отечественных Классификационных обществ, которая напрямую связана с исследованием выше обозначенных вопросов.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что для сертификации армирующих материалов из базальтового волокна отечественные Классификационные общества, осуществляющие техническое наблюдение и надзор за судами, должны быть обеспечены информацией об особенностях проектирования, конструирования и изготовления судов из композитов на основе этого материала, а также об эксплуатационном поведении их конструкций. Эта информация станет базой для внесения в Правила Классификационных обществ изменений и дополнений, регламентирующих процессы проектирования, постройки и эксплуатации судов с корпусами из композитов на основе базальтового волокна.

Сегментом применения базальта в качестве армирующих волокон в судостроении, по-видимому, является область создания судовых корпусных конструкций с повышенной весомой эффективностью типа надстроек судов на подводных крыльях и судов на воздушной подушке, а также область создания спасательных средств, предназначенных для спасения в экстремальных условиях типа спасательных шлюпок для танкеров.

Библиографический список

1. Dorigato, A. Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates [Text] / A. Dorigato, A. Pegoretti // Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 48(9) 1121–1130.
2. Choi, J. Bonding Properties of Basalt Fiber and Strength Reduction According to Fiber Orientation [Text] / Jeong-II Choi, Bang Yeon Lee // Materials. 2015. 8. 6719–6727.
3. Ribero, D. Properties of Geopolymer Composites Reinforced With Basalt Chopped Strand Mat or Woven Fabric [Text] / Daniel Ribero, Waltraud M. Kriven // Journal of The American Ceramic Society. 2016. 1-8.
4. De Rosa, I. Post-impact mechanical characterization of glass and basalt woven fabric laminates [Text] / Igor M. De Rosa, Francesco Marra, Giovanni Pulci, Carlo Santulli, Fabrizio Sarasini, Jacopo Tirillò, Marco Valente // Materials. 2012. 6. 3819–3826.
5. Happach, W. Adhesion test of resin-infused basalt fibers [Text] / W. Happach, D. Pico, A. Lüking, T. Gries // Materials. 2013. 4. 2768–2779.
6. Colangelo, F. Preparation and Characterization of New Geopolymer-Epoxy Resin Hybrid Mortars [Text] / Francesco Colangelo, Giuseppina Roviello, Laura Ricciotti, Claudio Ferone, Raffaele Cioffi // Materials. 2013. 6. 2989-3006.
7. Parnas, R. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites report [Text] / Richard Parnas, Montgomery Shaw, Qiang Liu, Student Assistant // New England Transportation Consortium August. 2007 NETCR63 Project № 03-7.
8. K Arun Prasath. Mechanical properties of woven fabric basalt/jute fibre reinforced polymer hybrid composites [Text] / K Arun Prasath, B Radha Krishnan // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2013.
9. Min, Z. Experimental Research on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Composites [Text] / Zhang Min, WU Gang, Jiang Yumei, Tian Ye, Hu Xianqi // Materials. 2014. 5. 3828–3842.
10. Farsani R.E. Creep behavior of basal tand glass fiber reinforced epoxy composites [Text] / Reza Eslami Farsani, Seyed Mohammad Reza Khalili, Vahid Daghighi, Reza Fazaeli // Journal of Mechanical Research and Application JMRA Vol. 3. № 1. 2011. 29-36.
11. Smriti Raj. Compressive behavior of Basalt Fiber Reinforced Composite [Text] // Proc. of the Intl. Conf. on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - CSM 2013.
12. Routray, S. Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Fabricated Plate Using Basalt Fiber [Text] / S. Routray, K.C. Biswal, M.R. Barik // Research Journal of Recent Sciences. Vol. 4(ISC-2014), 202-208 (2015) Res. J. Recent.
13. Van de Velde, K. Basalt fibers as reinforcement for composites [Text] / K. Van de Velde, P. Kiekens, L. Van Langenhove // Materials. 2011. 5. 4819–4826.
14. Czigan, T. Basalt fibers as a reinforcement of polymer composites [Text] / Tibor Czigan, János Vad, Kornél Poloskei // Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Vol. 49. № 1. Pp. 3–14 (2005).
15. Rajkumar, S1. Experimental Research on the fundamental mechanical properties of basalt fiber reinforcement with epoxy [Text] / S1. Rajkumar, K. Marimuthu. // International Journal of innovative research in science, engineering and technology (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol. 3. Issue 11. November 2014.
16. Singha, K. A Short Review on Basalt Fiber [Text] / Kunal Singha // International Journal of Textile Science. 2012. 1(4). P. 19-28.
17. Францев, М.Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов [Текст] // Морской вестник. 2008. № 4(28). С. 93-98.
18. Францев, М.Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок

[Текст] // Труды Государственного крыловского научного центра. Вып. 75 (359). 2013. С. 192-200.

19. Францев, М.Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов [Текст] // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 3. С. 86-97.
20. Францев, М.Э. Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение [Текст] // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1. С. 67-73.