

Францев М. Э. к.т.н.
Инжиниринговая компания «Нептун-Судомонтаж»
gerard629@yandex.ru

Проценко В. В.
Судостроительная компания «Нептун»
hovercraft@mail.ru

Верификация прочностных расчетов надстройки амфибийного пассажирского судна

Для современного пассажирского амфибийного судна на воздушной подушке (АСВП) наилучшим является сочетание легких сплавов для корпуса и композитов для надстройки. В настоящее время не существует полноценной теории проектирования надстроек из композитов АСВП, поэтому при проектировании АСВП «Нептун-23» использовались проектные методики расчетов прочности, предназначенные для судов других типов. Выполнена верификация этих методик методами неразрушающего контроля.

Введение

Выполненные исследования [1–3 9, 10] показывают, что наиболее предпочтительным для современного пассажирского амфибийного судна на воздушной подушке (далее АСВП) является сочетание легких сплавов для конструкций корпуса и композиционных материалов для конструкций надстройки. Теоретически использование полимерных композитов для изготовления надстройки пассажирского АСВП позволяет обеспечить аэродинамическое совершенство формы надводной части судна в сочетании с необходимой экономией веса конструкции.

У отечественных судостроителей есть определенный опыт создания пассажирских АСВП, имеющих надстройки из композитов. В качестве примеров можно привести АСВП проектов 18801, 18802, 18803 «Пума», проектов 15060 и 15053 «Ирбис», проектов МАРС-2000 и МАРС-3000, проектов АРКТИКА, а также ряд других судов (рисунок 1). В то же время не существует детально разработанной теории проектирования надстроек из композитов для данного типа судов. Отсутствие такой теории, в ряде случаев, приводит к избыточному весу надстройки из композитов, что, в свою очередь, ведет к снижению полезной нагрузки АСВП или ухудшению его амфибийных качеств, а часто и тому, и другому. Неправильные технологические решения при проектировании влекут за собой преждевременное разрушение композитных конструкций надстроек АСВП и другие проблемы.

Постановка задачи

Проектирование крупного элемента судовой корпусной конструкции из композитов по критерию весовой эффективности представляет собой трехмерную задачу. Это проектирование собственно конструкции, проектирование технологии изготовления ее основных элементов, а также проектирование композиционного материала для конструкции на базе определенных исходных материалов, выбор которых определяется экономической целесообразностью.

Проектирование судовых корпусных конструкций из композитов только на основе учета действующих на них эксплуатационных нагрузок позволяет существенно снизить их массу. Например, теоретически конструкция из композитов на основе углеродного волокна на 45–50% легче по отношению к аналогу из легких сплавов. При этом одновременно происходит снижение расходов в течение жизненного цикла конструкции, как минимум, на 25%, что может повлечь за собой существенное снижение срока окупаемости затрат на строительство судна. Пока углеродное волокно дорого. Но по сообщениям в специализированных периодических изданиях к 2020 году ожидается снижение цен на него до 10 \$ за кг, что сделает конструкции из композитов на основе углеродного волокна вполне конкурентоспособными.

При использовании в конструкции пассажирского АСВП надстройки из композитов, спроектированной по критерию весовой эффективности, образовав-



Рисунок 1. Амфибийные суда на воздушной подушке, имеющие корпус из легких сплавов и надстройку из композитов: 1 — АСВП «Ирбис», 2 — «Пума», 3 — МАРС 2000, 4 — МАРС 3000, 5 — АРКТИКА, 6 — АРКТИКА 4Д.

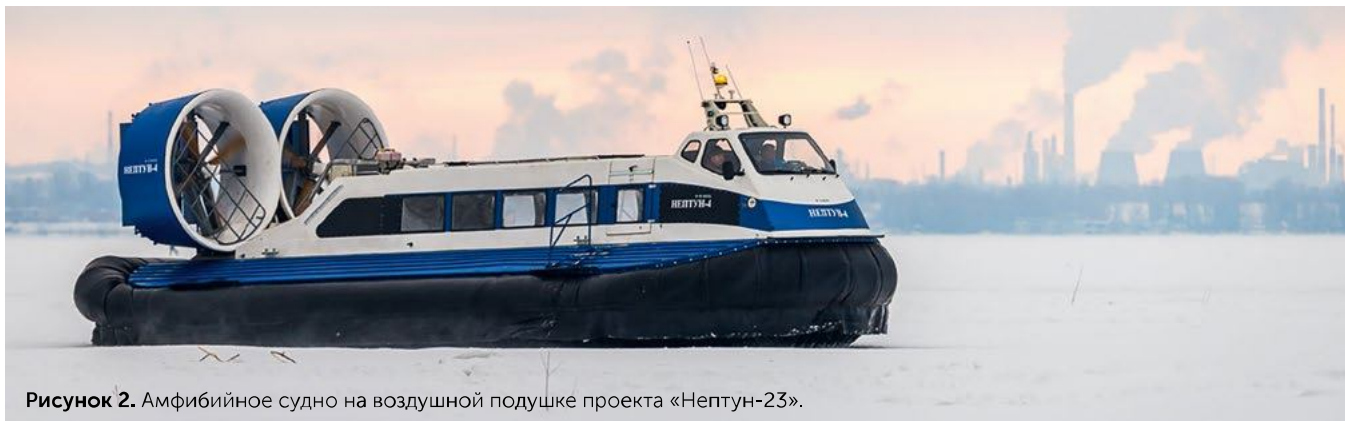


Рисунок 2. Амфибийное судно на воздушной подушке проекта «Нептун-23».

шаяся экономия массы частично может быть направлена на повышение полезной нагрузки судна и улучшение других его эксплуатационных характеристик, включая повышение амфибийных качеств и дальности действия. [2]

Проектирование надстройки из композитов пассажирского АСВП по критерию весовой эффективности с позиций обеспечения характеристик ее долговечности представляет собой взаимосвязанную последовательность принятия проектных решений, опирающихся на специально разработанные методы и технологии. Оно увязано с общей схемой оптимизации проектных характеристик АСВП. Появляется возможность обеспечить пассажирскому судну, имеющему в конструкции крупный элемент из композитов в виде надстройки, необходимые эксплуатационные качества, включая обеспечение технико-экономических требований. Требование весовой эффективности надстройки из композитов обуславливает ограничение ее толщины и связанные с этим повышенные требования к ее прочности и устойчивости в течение всего жизненного цикла.

Надстройка пассажирского амфибийного судна на воздушной подушке представляет собой многослойную оболочку обтекаемой формы, изготовленную из полимерных композитов. Надстройка крепится по периметру к металлическому корпусу судна, изготовленному из алюминиевых сплавов, с помощью соединений, технология изготовления которых достаточно отработана.

Необходимые эксплуатационные характеристики такого крупного элемента из композитов, как надстройка АСВП, могут обеспечить только эффективные оптимальные судовые корпусные конструкции, имеющие минимальное ухудшение прочностных характеристик в течение жизненного цикла. Под оптимальной конструкцией из композита понимается конструкция, работающая наилучшим образом при эксплуатационных нагрузках и удовлетворяющая заданному критерию оптимальности. Под эффективностью конструкции также понимается степень интеграции её элементов в единую (не сборную) конструкцию, обладающую необходимыми характеристиками долговечности. Поэтому эффективность конструкций, а также технологий их создания и сопровождения приобретают особую актуальность. Одним из центральных вопросов обеспечения весовой

эффективности и характеристик долговечности оптимальной подсистемы «Надстройка АСВП из композитов» при проектировании является обеспечение характеристик ее прочности в течение экономического 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. При этом функциональные возможности технологий проектирования и осуществления процессов формообразования должны быть согласованы для работы в установленных диапазонах изменения параметров оптимизации. При разработке таких согласованных технологий возникает новый класс задач, которые требуют согласованных решений, как на техническом уровне, так и на уровне исследований.

К согласованным задачам относятся также задачи конструкторского и технологического проектирования. Известно, что оптимальные анизотропные конструкции несут нагрузки различной физической природы (силовые, тепловые, световые, избыточная влажность, низкие температуры и др.), которые вызывают существенные механические напряжения в материале. Их нужно армировать в соответствии с совокупностью (схемой) направлений (траекторий) распространения напряжений (деформаций) внутри тела конструкции. При этом армирующие материалы должны располагаться в теле судовой корпусной конструкции из композита установленным при оптимизации образом. Это эквивалентно построению модели процесса формообразования, использующей найденные значения параметров оптимизации, найденные эквивалентные реализуемые траектории и очередность укладки армирующих материалов на изменяющуюся поверхность выкладки, а также ограничение исполнительной системы формообразования. В результате такого проектирования можно получить виртуальную пространственную модель армированной анизотропной конструкции, которую можно подвергнуть анализу. Несколько итераций подобного анализа и синтеза приведёт к технологически реализуемой оптимальной конструкции.

Связной задачей является задача обеспечения качества композита при ограниченной производительности исполнительной системы формообразо-

вания и ограниченном времени жизни связующего материала, которая сводится к задаче синтеза соответствующих схем армирования и одновременной пропитки их связующим. В настоящее время существуют возможности создания конкурентоспособных технологий и обеспечивающей их инфраструктуры, позволяющих обеспечить высокие эксплуатационные качества крупных элементов скоростных судов из полимерных композитов за счет создания эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из этих материалов.

Известно, что 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 технологической природы, а также возникновение и последующий рост внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационной природы. Это обстоятельство требует от проектанта выполнения при оценке прочности судовой корпусной конструкции из композитов специального расчета, направленного на учет влияния внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы на прочность элемента конструкции. Принципы проектирования крупного элемента корпуса скоростного судна из композитов по условиям его весовой эффективности и обеспечения жизненного цикла изложены в [4].

Оценка характеристик долговечности судовой корпусной конструкции из композита, при условии существования в ней внутренних дефектов технологической, а впоследствии и эксплуатационной природы, тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанного с этим снижения прочности конструкции и повышения вероятности ее разрушения.

Оценка изменения характеристик долговечности представляет собой сопоставление прочностных свойств целой и расслоившейся конструкции 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 оценкой возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композита в зоне развития дефекта типа расслоение технологической и эксплуатационной природы. Подробно все эти вопросы рассматриваются в работе [5].

Решение

Как было сказано выше, в настоящее время не существует полноценной теории проектирования надстроек из композитов АСВП. Поэтому при создании надстройки АСВП проекта «Нептун-23», которая была

разработана только на основе учета действующих на нее эксплуатационных нагрузок, и при сертификации проекта по Правилам Российского Речного Регистра (далее РРР), перед проектантом и экспертом РРР, рассматривавшим данный проект, в роли которого выступал один из авторов этой статьи, встал ряд вопросов по обоснованию некоторых проектных методик, в первую очередь, в области расчетов прочности.

В результате для выполнения прочностных расчетов надстройки АСВП проекта «Нептун-23» был выбран ряд методик из области проектирования судов на подводных крыльях (далее СПК) с корпусами и надстройками, изготовленными из легких сплавов. Далее эти методики были адаптированы для надстройки из полимерного многослойного композита.

Год спустя под руководством одного из авторов статьи в МГТУ имени Баумана в рамках одной из Федеральных целевых программ была разработана методика проектирования надстройки из композитов пассажирского СПК, включающая проектные обоснования расчетов прочности. Но при сертификации проекта АСВП «Нептун-23» по Правилам РРР эти методики еще не были разработаны.

Определение исходных матричной и армирующей фаз композита и схем армирования, а также обоснование выбора материалов, схем и способов закрепления закладных деталей при проектировании надстройки АСВП проекта «Нептун-23» было произведено с учетом предполагаемых технологий ее изготовления. Для обеспечения необходимых экономических параметров изделия при изготовлении его малой серией было применено контактное формование. В качестве основных матричных и армирующих материалов для изготовления надстройки были применены стеклоткань, стеклоткань и полиэфирная смола. В качестве материала легкого среднего слоя надстройки из композитов были использованы пенопласты.

Для верификации прочностных расчетов надстройки из композитов пассажирского АСВП «Нептун-23» было принято решение производить ее исследования методами неразрушающего контроля в процессе эксплуатации судов этого проекта на их жизненном цикле.

Одним из наиболее удобных мест для выполнения данной работы было Самарское речное пассажирское предприятие (город Самара), в эксплуатации которого на протяжении ряда лет находятся три АСВП проекта «Нептун-23», введенные в эксплуатацию с разницей в один год. Эти АСВП эксплуатируются в основных расчетных режимах: при движении на открытой воде, при движении по битому льду, при движении по целому льду, по торосам и прочим.

При исследовании АСВП «Нептун-4», «Нептун-7», «Нептун-8» находились на стапель-тумбах на территории причальной стенки Речного вокзала города Самара. Доступ ко всем судовым корпусным конструкциям из композитов был обеспечен, в основном, с наружной стороны в связи с тем, что внутренние поверхности конструкций из композитов в пассажирских помещениях и в ходовых рубках закрыты зашивками и изоля-

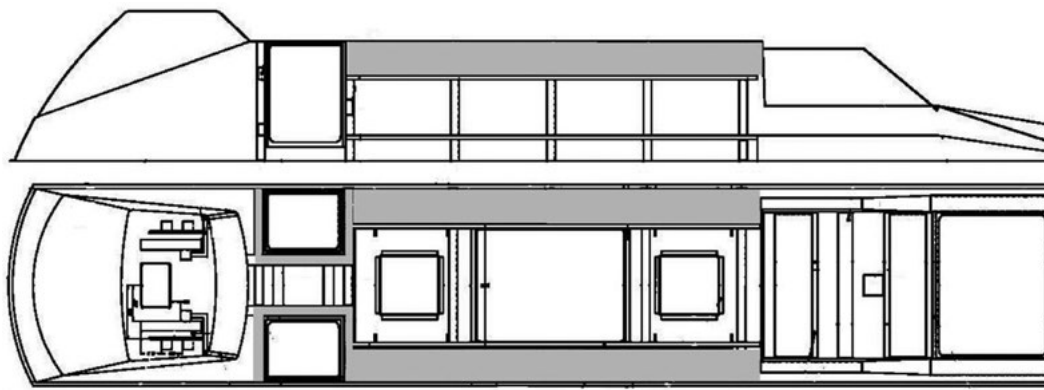


Рисунок 3. Обобщенная схема расположения внутренних дефектов типа расслоение (выделено серым цветом) на надстройке АСВП проекта «Нептун-23», полученная по результатам дефектоскопии.

цией. Поэтому внешний осмотр и исследование методами неразрушающего контроля производились при одностороннем доступе.

Внешнему осмотру и исследованиям методами неразрушающего контроля подвергались наружные поверхности ходовой рубки, наружные поверхности надстройки в районе пассажирского салона, район воздухозаборников нагнетателей. Только внешнему осмотру подвергались двери и крышки люков, а также кольцевые насадки воздушных винтов правого и левого бортов, в связи с тем, что доступ к их внутренним поверхностям был невозможен без демонтажа ограждений насадок, а доступ к их наружным поверхностям был невозможен без демонтажа облицовок насадок.

В качестве инструмента неразрушающего контроля использовался акустический дефектоскоп ДАМИ-С, реализующий импедансный метод и метод свободных колебаний. В качестве основного метода неразрушающего контроля в приборе реализован импедансный амплитудно-фазовый метод звукового и ультразвукового контроля в частотном диапазоне 1...40 кГц с применением сухого точечного контакта при одностороннем доступе.

Учитывая многообразие сочетаний конструктивных элементов, схем армирования и расположения подкреплений в надстройке АСВП из композитов, обнаружение внутренних дефектов типа расслоение (непроклей) опиралось на сочетание различных методов неразрушающего контроля, реализуемых дефектоскопом, в сочетании с различными преобразователями. Выбор метода контроля и типа преобразователя определялся экспериментально для каждого элемента конструкции.

При контроле элементов конструкций с внутренними элементами, обладающими газонаполненной структурой (пенопластами), контролю подвергались слои, расположенные до газонаполненной структуры. При этом наибольшее внимание было уделено наиболее нагруженным связям, расположенным в верхнем поясе эквивалентного бруса, имеющим наибольшее влияние на обеспечение общей прочности АСВП. Подробнее такого рода исследования описаны в [6-7].

Исследование методами неразрушающего контроля производилось со следующими целями:

- определение качества проектирования и изготовления конструкции, а также адекватности применения проектных методик расчета прочности, разработанных конструктивных схем изделия, технологий его изготовления и исходных материалов для формования композита;
- выявление мест расположения внутренних дефектов типа расслоение технологической природы для последующего определения степени влияния этих дефектов на прочностные характеристики элементов конструкции, а также корректировки технологических процессов изготовления;
- соотнесение этих мест с известными из анализа опыта эксплуатации АСВП местами вероятного возникновения различных дефектов эксплуатационной природы для последующей оценки возможности дальнейшего развития внутренних дефектов типа расслоение в процессе эксплуатации.

При записи результатов дефектоскопии указывалась площадь дефектов, координаты их месторасположения, метод дефектоскопии, марка и номер дефектоскопа, марка и номер преобразователя, а также размеры выявляемых дефектов.

Сохранение полученных данных о размерах дефектов и координатах мест их расположения в протоколе контроля, с указанием координат от базовых плоскостей и осей изделия позволяет дискретно, через определенные промежутки времени наблюдать за изменением размеров дефектов в течение всего жизненного цикла судна. Результаты нескольких последовательно проведенных исследований позволят получить динамику изменения размеров дефектов, пригодную для оценки методами регрессионного анализа.

Выводы

По результатам исследований надстроек АСВП проекта «Нептун-23» методами неразрушающего контроля по каждому из объектов исследования составлена карта расположения внутренних дефектов типа расслоение, позволяющая в дальнейшем следить за их развитием в процессе эксплуатации судна. На основе анализа карт была составлена обобщенная схема расположения внутренних дефектов типа расслоение на надстройках АСВП проекта «Неп-

тун-23» (рисунок 3).

В результате выполненных исследований установлено, что, в основном, в надстройках имеются внутренние дефекты типа расслоение (непроклей) технологической природы. Их размеры, количество и места расположения подтверждают, что, в целом, качество изготовления надстроек АСВП проекта «Нептун-23» соответствует требованиям технических условий и нормативных документов [8]. Внутренние дефекты типа расслоение (непроклей) технологической природы имеют малую площадь, признаваемую нормативными документами допустимой, поэтому дополнительные расчеты прочности надстройки, учитывающие наличие в элементах надстройки дефектов, не потребовались. Хотя, безусловно, эти дефекты являются концентраторами напряжений.

В то же время, в местах вероятного возникновения максимальных нагрузок, определенных расчетами прочности, внутренних дефектов типа расслоение эксплуатационной природы обнаружено, в основном, не было. Это подтверждает тот факт, что композит надстройки пока воспринимает эксплуатационные нагрузки без разрушения.

Выполненная верификация прочностных расчетов надстройки из композитов пассажирского АСВП путем ее исследования методами неразрушающего контроля в процессе эксплуатации подтвердила адекватность примененных проектных методик расчетов прочности надстройки АСВП «Нептун-23», что позволяет в дальнейшем использовать данные методики при проектировании других судов этого типа.

По результатам исследований были сформулированы рекомендации по доработке технологических процессов изготовления надстроек, а также дополнительные проектные обоснования по применению исходных материалов для композита надстройки. Верификация прочностных расчетов надстройки из композитов пассажирского АСВП путем ее исследования методами неразрушающего контроля в процессе эксплуатации позволяет использовать эти расчеты в качестве базы при сертификации других судов этого типа по Правилам РРР.

Дальнейшие исследования надстроек АСВП проекта «Нептун-23» методами неразрушающего контроля на жизненном цикле позволят рассмотреть вопросы изменения прочности композита, связанные с его старением под влиянием неблагоприятных эксплуатационных факторов: таких как солнечная радиация, низкие температуры и ряд других.

Необходимо отметить, что проектирование надстроек АСВП проекта «Нептун-23» из композитов только на основе учета действующих на них эксплуатационных нагрузок, наряду с другими проектными решениями, позволило обеспечить судну эксплуатационные характеристики, существенно превышающие аналогичные характеристики судов-конкурентов. Так, например, АСВП проекта «Нептун-23» имеет коэффициент утилизации по полезной нагрузке на 13,7% больший, чем у АСВП проекта АРКТИКА-4Д, при расходе топлива на 1 пасс-км более чем в 4,2 раза меньшем, чем у этого АСВП, при одинаковой пасса-

жировместимости.

Это преимущество обеспечено, в том числе, за счет проектирования надстройки из композитов по принципам весовой эффективности и с позиций обеспечения характеристик долговечности.

Авторы статьи выражают благодарность главному инженеру Самарского речного пассажирского предприятия М. Н. Кирбенёву за содействие в проведении исследований. **КМ**

Список литературы

1. Андреев Г. Е., Кудрявцев А. С., Проценко В. В., Рубинов А. В., По воде и по суше (Очерки о разработке и применении судов-амфибий) – М. ИНИЦ Роспатента, 2002. – 272 с.
2. Францев М. Э. Проектное обоснование повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке за счет применения в его конструкции композиционных материалов. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, № 1, 2015 197–202 с.
3. Францев М. Э. Использование параметрических методов на ранних этапах разработки проекта амфибийных судов на воздушной подушке, полностью или частично изготовленных из композитов. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, № 1, 2014 стр. 172–179
4. Францев М. Э. Принципы проектирования корпуса скоростного судна из композитов по условиям его весовой эффективности и обеспечения жизненного цикла. Известия Калининградского государственного технического университета, 2016. № 41 стр. 196–208.
5. 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. Конструкции из композиционных материалов, № 1, 2016, стр. 67–73
6. Францев М. Э. Дефектоскопия корпусов судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, акустическими методами неразрушающего контроля. Дефектоскопия, 2013, № 1, стр. 3–11
7. Францев М. Э. Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля. В мире НК, № 4, 2016, стр. 13–17
8. ОСТ5.9102-87 «Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля», Л., ЦНИИТС, 1987, 36 с.
9. Greene E. Marine composites. Second Edition. Eric Greene Associates, Inc., Annapolis, 1999, p. 377
10. Yun L., Bliault A., Theory Design Air Cushion Craft. Arnold a member of the Hodder Headline Group, London, 2000, p. 631