

УДК 629.12.001

Создание надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с позиций обеспечения ее весовой эффективности и характеристик долговечности

М. Э. ФРАНЦЕВ, канд. техн. наук

АО "Нептун-Судомонтаж", г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления композитной надстройки пассажирского судна на подводных крыльях (СПК) с учетом массовой эффективности с позиций обеспечения ее долговечности. В процессе подготовки к созданию композитной надстройки по критерию массовой эффективности проводились проектирование ее конструкции, выбор композиционного материала и технологии изготовления из него конструкции на базе определенных исходных материалов и технологий. В качестве материала конструкции выбран полиэфирный стеклопластик. Методом контактного формования изготовлен опытный образец композитной надстройки. Установлено, что качество его изготовления соответствует требованиям технических условий.

Ключевые слова: пассажирское судно на подводных крыльях, композитная надстройка, композиты, проектирование, опытный образец, снижение массы, долговечность, внутренние дефекты типа расслоения, неразрушающий контроль.

Создание композитной надстройки СПК с учетом действующих на нее эксплуатационных нагрузок позволяет существенно снизить ее массу. Так, теоретически конструкция из композитов на основе углеродного волокна на 45—50 % легче аналога из легких сплавов. Одновременно имеет место снижение эксплуатационных расходов в течение жизненного цикла как минимум на 25 %, что может повлечь за собой существенное снижение срока окупаемости затрат на строительство судна. Стоимость углеродных волокон высока, но по сообщениям специализированных периодических изданий к 2020 г. она может быть снижена до 10 дол. за 1 кг, что сделает конструкции из композитов на основе этих волокон весьма конкурентоспособными.

Использование легких сплавов для изготовления собственно корпуса пассажирского СПК, а полимерных композиционных материалов — для изготовления надстройки позволяет обеспечить аэродинамическое совершенство формы надводной части судна и снизить массу конструкции [1].

Использование композитной надстройки пассажирского СПК (рис. 1) позволяет также обеспечить пассажирскому СПК необходимые эксплуатационные характеристики, включая обеспечение технико-экономических требований.

Требование массовой эффективности композитной надстройки обуславливает ограничение ее

толщины и связанные с этим повышенные требования к ее прочности и устойчивости в течение всего жизненного цикла.

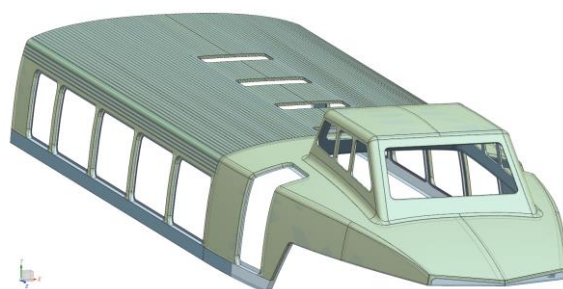


Рис. 1. Композитная надстройка СПК (исходная геометрия)

Образовавшаяся в результате использования композитной надстройки экономия массы корпуса частично может быть направлена на повышение его полезной нагрузки и других эксплуатационных характеристик, включая повышение дальности действия. Применение аналогичных подходов в авиации позволило значительно увеличить экономическую эффективность перевозок. Объем применения композитов в конструкции современных самолетов последних поколений достигает 40—60 %.

Постановка задачи

Композитная надстройка скоростного пассажирского СПК, представляющая собой многослойную оболочку обтекаемой формы, крепится по периметру к металлическому корпусу СПК, изготовленному из алюминиевых сплавов, с помощью соединений, технология изготовления ко-

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

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2017 г.

© Францев М. Э., 2018

торых достаточно обработана. Пассажирское СПК с надстройкой из многослойной композитной оболочки защищено патентом РФ № 148323 [2]. Проектные обоснования создания надстройки из композитов для пассажирского СПК изложены в [3].

Необходимые эксплуатационные характеристики такого крупногабаритного элемента из композитов, как надстройка СПК, могут обеспечить только эффективные оптимальные судовые корпусные конструкции, имеющие минимальное ухудшение прочностных свойств в течение жизненного цикла. Под оптимальной понимается конструкция, работающая наилучшим образом при эксплуатационных нагрузках и удовлетворяющая заданному критерию оптимальности. Под эффективностью конструкции понимается степень интеграции ее элементов в единую (не сборную) конструкцию, обладающую необходимой долговечностью. Поэтому эффективность конструкций, а также технологий их создания и характеристики долговечности приобретают особую актуальность. Одной из основных задач обеспечения массовой эффективности и долговечности оптимальной подсистемы "Надстройка СПК из композитов" при проектировании является обеспечение характеристик ее прочности в течение экономически обоснованного жизненного цикла.

Для проектирования и изготовления эффективных оптимальных судовых корпусных конструкций из композитов предпочтительны технологии формообразования, способные изменять параметры оптимизации конструкций в широких пределах, например вакуумная инфузия или различные виды RTM-процессов. Функциональные возможности технологий проектирования и процессов формообразования должны обеспечивать работу конструкций в установленных диапазонах изменения параметров оптимизации. При разработке таких согласованных технологий возникает новый класс задач, требующих согласованных решений как на техническом уровне, так и на уровне исследований.

К согласованным относятся также задачи конструкторского и технологического проектирования. Известно, что оптимальные анизотропные конструкции несут нагрузки различной физической природы (силовые, тепловые, световые, влажностные (избыточная влажность) и т. д.), которые вызывают существенные механические напряжения в материалах. Армирующие материалы должны располагаться внутри тела композитной конструкции в соответствии с совокупностью (схемой) направлений (траекторий) распространения напряжений (деформаций). 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 ограничению исполнительной системы формообразования. В результате проектирования можно получить виртуальную пространственную модель армированной анизотропной конструкции, которую можно подвергнуть анализу. Несколько итераций подобного анализа и синтеза приведет к технологически реализуемой оптимальной конструкции.

Связной является задача обеспечения качества композита при ограниченной производительности исполнительской системы формообразования и ограниченной жизнеспособности связующего материала, которая сводится к выбору соответствующих схем армирования и одновременной пропитки армирующего материала связующим. Существуют возможности создания конкурентоспособных технологий изготовления крупногабаритных композитных элементов, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики судов.

В процессе изготовления композитных судовых корпусных конструкций в них появляются технологические дефекты типа расслоения (непроклей), что приводит к снижению прочности конструкции. (рис. 2).



Рис. 2. Последовательности декомпозиции (а) и оценки влияния внутреннего дефекта (б) при определении прочностных свойств композитного крупногабаритного элемента судна

В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа расслоения как технологической, так и эксплуатационной природы. Поэтому при оценке прочности композитной судовой корпусной конструкции необходимо провести специальный расчет, учитывающий влияние внутренних дефектов технологической и эксплуатационной природы на прочность элемента конструкции.

Принципы проектирования композитного крупногабаритного элемента корпуса скоростного судна с учетом его массовой эффективности и обеспечения жизненного цикла изложены в [4].

Изготовление опытного образца композитной надстройки СПК

Определение исходных матричной и армирующей фаз композита и схем армирования, а также обоснование выбора материалов, схем и способов закрепления закладных деталей надстройки СПК производятся с учетом предполагаемых технологий ее изготовления. В качестве основных технологий изготовления композитной надстройки СПК на этапе НИОКР рассматривалось контактное

формование, а на этапе серийного производства — вакуумная инфузия. В качестве армирующих и матричных материалов для изготовления опытного образца надстройки СПК с учетом необходимости импортозамещения выбраны стеклосетка, стеклоткань и полиэфирная смола отечественного производства. Армирующие материалы на основе углеродного волокна из финального выбора были исключены в связи с их неприемлемо высокой стоимостью.

В качестве материала легкого среднего слоя надстройки принят импортный поливинилхлоридный пенопласт. Ближайший отечественный аналог имеет существенно большую плотность, поэтому его использование ведет к перевесу композитной надстройки почти в два раза.

Создание рабочего проекта композитной надстройки было произведено в среде моделирования ANSYS Workbench. Модель проектного обеспечения прочности надстройки с использованием численных методов описана в [5]. Конечно-элементная модель композитной надстройки показана на рис. 3, а области перегрузок от действия изгибающего момента приведены на рис. 4.

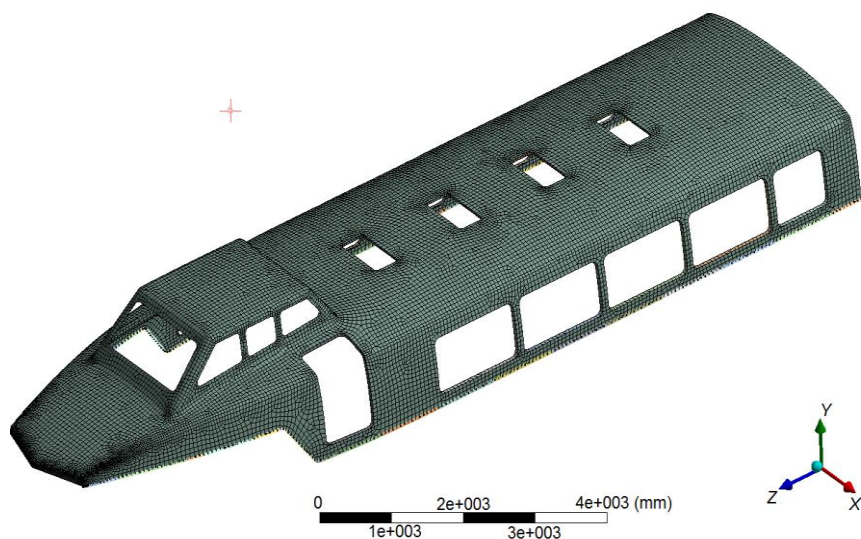


Рис. 3. Конечно-элементная модель композитной надстройки СПК с разбиением

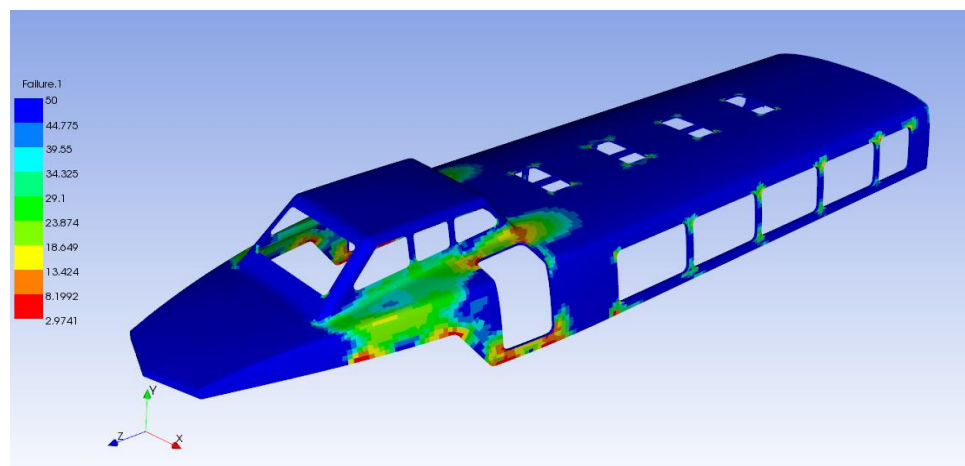


Рис. 4. Области перегрузок от действия изгибающего момента в композитной надстройке СПК (зачернены)

Анализ результатов расчетов показал, что прочность композитной надстройки СПК обеспечена во всех расчетных случаях. Распределение внутренних усилий, действующих в надстройке, в целом имеет характер, описанный в специализированной литературе, что свидетельствует о корректном определении внешних нагрузок.

Методом контактного формования в открытой оснастке изготовлен опытный образец композитной надстройки СПК в единичном экземпляре (рис. 5), свойства его поверхности исследованы методами неразрушающего контроля



Рис. 5. Опытный образец композитной надстройки СПК

Метод является самым простым, давно отработанным и требующим наименьших капиталовложений. Как уже было сказано, для изготовления серийных изделий целесообразно использование метода вакуумной инфузии.

Оценка характеристик долговечности композитной судовой корпусной конструкции при условии существования в ней внутренних дефектов технологической, а впоследствии и эксплуатационной природы, тесно переплетается с проблемой прогнозирования динамики их развития и связанных 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 композитной судовой корпусной конструкции, а также с методами определения степени утраты прочностных свойств и оценкой возможности разрушения в зоне развития дефекта типа расслоения технологической и эксплуатационной природы. Подробно эти вопросы рассмотрены в работе [6].

Результаты и обсуждение

После изготовления опытного образца композитной надстройки 100 % его поверхности снаружи и изнутри были исследованы методами неразрушающего контроля (см. рис. 5) в соответствии с требованиями нормативных документов [7] способами, описанными в [8]. Цели исследований:

- определение качества проектирования и изготовления конструкции, а также адекватности применения технологий и исходных материалов для формования композитной конструкции;
- выявление мест расположения внутренних дефектов типа расслоения технологической природы для последующего определения степени влияния этих дефектов на прочностные свойства элементов конструкции;
- соотнесение этих мест с известными из анализа опыта эксплуатации СПК местами вероятного возникновения внутренних дефектов типа расслоения эксплуатационной природы для последующей оценки возможности объединения и дальнейшего развития дефектов в процессе эксплуатации.

Установлено, что в целом качество изготовления композитного опытного образца соответствует требованиям технических условий и нормативных документов [5]. Составлена карта расположения внутренних дефектов типа расслоения технологической природы (непроклей), позволяющая в дальнейшем следить за их развитием в процессе эксплуатации элемента судна. В местах вероятного возникновения перегрузок, определенных расчетом прочности численными методами, внутренних дефектов типа расслоения (непроклей) обнаружено не было. В остальных местах внутренние дефекты имели малую площадь, признаваемую нормативными документами [7] допустимой, поэтому дополнительные расчеты не потребовались, хотя, безусловно, эти места являются концентраторами напряжений.

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. Несколько последовательных циклов исследований позволяет получить динамику изменения размеров дефектов, пригодную для оценки концентрации методами регрессионного анализа.

Взвешивание опытного образца показало снижение на 16,7 % массы композитной надстройки по отношению к сумме масс аналога, изготовленного из легких сплавов, а также элементов изоляции и зашивки на этом участке надстройки по проекту СПК 17091 "Полесье".

Заключение

Установлено, что при модернизации СПК проекта 17091 "Полесье" надстройкой из полимерных композитов его пассажироместимость может быть увеличена с 51 до 60 человек. Такой модернизированный проект СПК превосходит по экономичности на 33 % проект 23180 пассажирского СПК "Валдай-45Р", имеющего пассажироместимость 45 человек при одинаковой мощности главного двигателя.

В основу работы положены прикладные научные исследования, выполненные Московским государственным техническим университетом им. Н. Э. Баумана по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0103 с Министерством образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0103) в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы". Автор является руководителем работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Францев М. Э., Чуднов И. В. Новый облик судов на подводных крыльях для рек Сибири и Дальнего Востока // Судостроение. 2014. № 2. С. 18—22.
2. Францев М. Э., Симбирцев А. Д., Нелюб В. А., Буянов И. А., Чуднов И. В., Бородулин А. С. Пассажирское судно на подводных крыльях, имеющее надстройку из композиционных материалов. Патент на полезную модель № 148323, 2014.
3. Францев М. Э. Проектные обоснования создания надстройки из композитов для пассажирского судна на подводных крыльях с использованием способа параметрического проектирования // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. 2016. № 1. С. 211—221.
4. Францев М. Э. Принципы проектирования корпуса скоростного судна из композитов по условиям его весовой эффективности и обеспечения жизненного цикла // Изв. Калининградского государственного технического университета. 2016. № 41. С. 196—208.
5. Францев М. Э., Зайцев О. В., Золотаренко И. Д. Модель проектного обеспечения прочности надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с использованием численных методов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. 2016. № 3. С. 160—168.
6. 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. 2016. № 1. С. 67—73.
7. ОСТ5.9102-87 "Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля". — Л.: ЦНИИТС, 1987. — 36 с.
8. Францев М. Э. Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2016. № 4. С. 13—17.

Creation of superstructure from composites for passenger hydrofoil craft from positions of provision of its weight efficiency and durability characteristics

M. E. FRANTSEV

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

The problems of design and manufacturing of a composite superstructure of a passenger hydrofoil craft into account mass efficiency and from the viewpoint of ensuring its durability are considered. It is noted that in the process preparation for the creation of a composite superstructure on the basis of the criterion of mass efficiency, the design of its structure, the choice of composite material and the technology of manufacturing from it a design based on certain raw materials and technologies were carried out. As a material of the construction, polyester fiberglass plastic is chosen. The method of contact molding produced a prototype composite superstructure. It is established that the quality of its manufacture meets the requirements of technical specifications.

Keywords: passenger's hydrofoil craft, superstructure, composites, design, prototype, weight reduction, durability, internal defects type delamination, nondestructive testing.