

Применение современных средств компьютерного моделирования при проектировании и постройке скоростного пассажирского катамарана из углепластика

В статье рассказывается о применении программ компьютерного моделирования при подготовке, проектировании и изготовлении изделий из ПКМ на примере работы над высокоскоростным катамараном из углепластика. Описываются некоторые результаты численного моделирования сопутствующих технологических процессов и решения конструкторских задач. Также приводятся выводы по проделанной работе и направление развития используемых методик.

Ключевые слова: углепластик, катамаран, прочность, метод конечных элементов, технология изготовления ПКМ.

На фоне существующих на сегодняшний день потребностей гражданского флота в современных скоростных пассажирских судах на ОАО «Средне-Невском судостроительном заводе» проходит достройка перспективного углепластикового катамарана способного вмещать 150 пассажиров и развивать скорость до 30 узлов. Такой катамаран призван заменить устаревшие суда на подводных крыльях типа «Метеор», которые производились с 1961 по 1991 гг. и в настоящее время курсируют по туристическим маршрутам в акватории Финского залива. Очевидные преимущества нового катамарана по мореходным качествам, антикоррозионным свойствам и ремонтпригодностью в первую очередь связаны с применением полимерного композиционного материала (ПКМ). Немаловажную роль имеет также большая вместимость и комфортность пассажиров, в том числе в условиях волнения. Более низкий вес позволяет увеличить коммерческую эффективность при эксплуатации катамарана, проектантом которого выступил ЦКБ «Нептун» (рис. 1).

Реализации рабочего проекта предшествовала опытно-конструкторская работа, направленная на решение целого комплекса важных конструкторских и технологических задач, успешно выполненных специалистами ОАО «СНСЗ» совместно с Политехническим университетом (СПбГПУ). Несмотря на активное использование ПКМ за рубежом при создании маломерных судов, в нашей стране данный тип материала все еще является нетипичным для судостроения. В первую очередь это связано с отсутствием четких норм и правил проектирования скоростных судов из композитных материалов у отечественных классификационных обществ. Поэтому для утвержде-



Р. В. Васильев,
к. т. н., главный специалист
по расчету прочности ОАО «Средне-Невский
судостроительный завод»
vasilyevrv@snsz.ru

ния конструкции корпуса под класс морского РМРС [1] расчеты общей и местной прочности проводились с помощью универсальных математических моделей метода конечных элементов (МКЭ) (см. рис. 2).

Численное моделирование всех расчетных постановок проводилось на пространственных моделях. Корпус катамарана выполнен из перспективного композиционного материала трехслойного типа. Внешние слои выполнены из углепластика, средний слой — из пенопласта. Такой материал обладает рядом преимуществ по механическим и эксплуатационным показателям. В процессе нагружения расчетными нагрузками всего катамарана отдельные элементы корпуса испытывают сложное напряженное состояние различного характера, поэтому для достаточно точного анализа прочности необходимо иметь подробную информацию о механических свойствах анизотропного пластика.

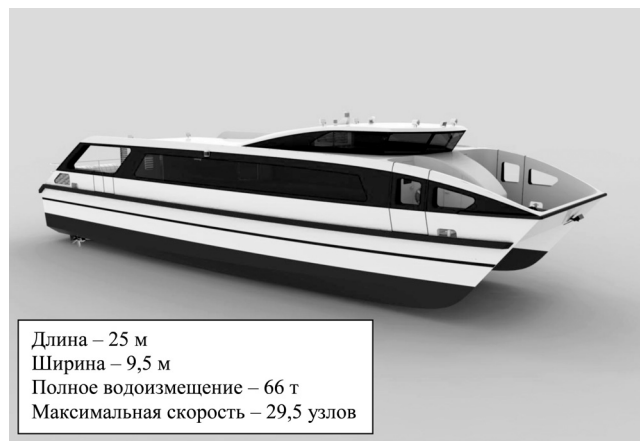


Рис. 1. Пассажирский катамаран (пр. 23290)

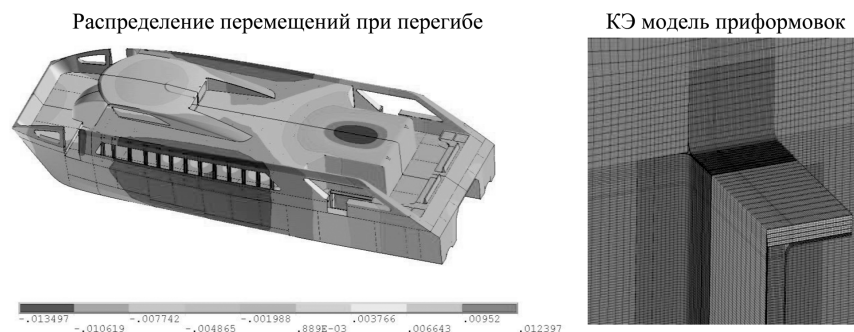


Рис. 2. Расчеты прочности по методу конечных элементов

Это означает, что механические характеристики, используемые в численном моделировании, должны быть максимально точно определены, с учетом особенностей технологии и качества изготовления изделия на предприятии, поэтому необходимо вести контроль обеспечения заявленных механических характеристик, что называется, не отходя от производства. Для определения свойств материала средствами разрушающего контроля во всех направлениях был проведен ряд испытаний пластиков, на основе используемых типов углетканей (всего в проекте используется 6 видов углетканей с различным армированием и переплетением). В том числе были проведены испытания на сдвиг в плоскости слоев, которые ранее не проводились на заводе. Испытания проводились с помощью приспособления в виде четырехзвенной жесткой шарнирной рамы, позволяющей перекашивать образец в плоскости листа (см. рис. 3).

Геометрические характеристики приспособления выбирались расчетным путем с использованием конечно-элементного комплекса Nastran [2]. С помощью спроектированной оснастки можно проводить испытания прочности на сдвиг образцов монолитных пластиков армированных волокнами, а также трехслойных панелей с различными наполнителями. Показателем ценности определения этих характеристик в работе над катамараном служит тот факт, что до того как были проведены эти испытания, для анализа прочности корпуса катамарана по расчетным постановкам в качестве пределов прочности на сдвиг в плоскости

слоев были взяты такие же значения как при межслойном сдвиге, что является допущением в безопасную сторону. Однако полученные результаты испытаний показали, что действительный предел прочности в этом направлении был занижен в 2,5 раза. Таким образом, экспериментальное определение прочностных характеристик в этом направлении позволило значительно увеличить точность анализа прочности и в итоге облегчить конструкцию.

Известно, что процесс создания конструкций из композиционных материалов проходит одновременно с созданием самого материала, поэтому технология изготовления напрямую влияет на эффективность и условия эксплуатации, проектируемой конструкции. Получив подробную информацию о заявленных свойствах готового пластика, были рассмотрены конечно-элементные постановки задач общей и местной прочности. После чего более подробно рассматривались отдельные элементы по уточненным формулировкам. В частности проводился численный анализ прочности используемых приформовок (см. рис. 2), район притыкания пиллерса к палубе, район притыкания шпангоута к палубе и др. При подробном анализе каждый используемый слой (толщиной менее 1 мм) моделировался с помощью твердотельных конечных элементов типа solid. Таким образом, в явном виде оценивается напряженно-деформируемое состояние каждого слоя с минимальным количеством допущений.

Следующим этапом опытно-конструкторской работы была отработка технологии изготовления

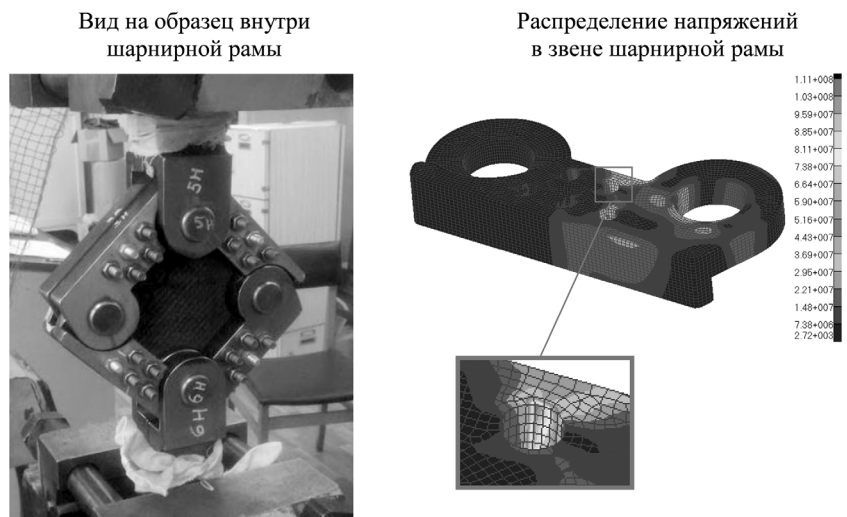
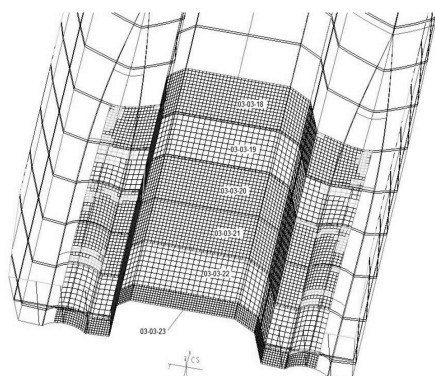


Рис. 3. Проведение испытаний образцов на сдвиг в плоскости слоев

гибридного композитного материала. На этапе создания корпуса использовалась технология вакуумной инфузии, которая была освоена и успешно отработана ОАО «СНСЗ» в стеклопластиковом судостроении. Достаточно сказать, что специалистами завода впервые в мире был изготовлен полностью монолитный стеклопластиковый корпус судна водоизмещением почти 1000 т, и это достижение было занесено в книгу рекордов Гиннеса. Однако технология изготовления конструкций из углепластиков имеет ряд отличительных особенностей. В частности, из-за темного цвета углеволокна имеются трудности визуального характера при определении зон непропитки углеткани связующим. Определение таких зон является важнейшим критерием качества изготовления композиционного материала, так как от этого зависит обеспечение заявленных механических свойств будущего материала, эксплуатационной надежности и полноты жизненного цикла судна. Недостаточная пропитка наряду с переизбытком связующего в ответственных элементах конструкции может привести к непоправимым последствиям в будущем. Еще один технологический процесс, предшествующий процессу пропитки это укладка сухой ткани в оснастку. Выбор оптимальной схемы укладки может значительно уменьшить трудоемкость, уменьшить количество отходов углеткани и уменьшить возможность получения некачественного материала после инфузии. При работе над катамараном специалистами ОАО «СНСЗ» использовалось компьютерное моделирование этих рабочих процессов, что позволило оптимально расходовать ресурсы при изготовлении и при этом обеспечить заявленные механические характеристики готового материала. Численная модель укладки углеткани в оснастку создавалась с помощью программного комплекса FiberSim [3]. В процессе создания модели сначала импортируется 3D-поверхность оснастки корпуса, затем определяется тип материала, будь то монолитный пластик или трехслойная конструкция (сэндвич-панель). Далее инженером задаются свойства всех используемых в корпусе сухих углетканей, определяется точка начала выкладки каждого слоя, определяется траектория и размеры вырезов для обеспечения лучшей драпируемости ткани без образования складок и различных неровностей.

Моделирование процесса выкладки сухой ткани на оснастку (различными цветами показаны деформации)



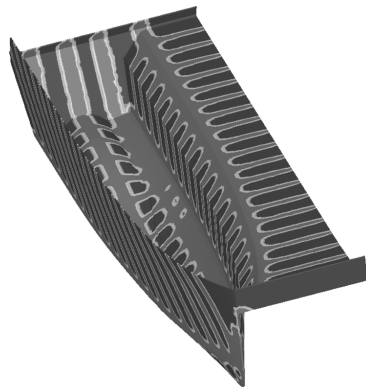
Таким образом, слой за слоем моделируется выкладка всего корпуса. При этом происходит графическое отображение областей деформаций углеткани, выложенной на криволинейную поверхность. Различными цветами показаны допустимые и недопустимые значения деформаций. Видя эту картину, инженер принимает решение о введении надрезов различной формы и длины. В случае избытка ткани в каком-то районе применяют V-образный надрез, в случае недостатка — надрез линейной формы. Форма и длина траектории надрезов и их расположение относительно друг друга зависят от вида армирующего материала, который выбирается с учетом требований к прочностным характеристикам. Нужно отметить, что выбор точки начала выкладки в меньшей мере влияет на картину деформаций и развертку укладываемого материала. Поэтому неверный выбор приведет к дополнительной трудоемкости, неправильной структуре пакета и к нерациональному использованию армирующего материала. Например, традиционно наиболее сложным районом для выкладки является носовая оконечность, где наружная обшивка имеет переменную по направлению погибь. И если в средней части корпуса технологически целесообразно выбрать точку начала выкладки в районе ДП (диаметральная плоскость), то в районе форштевня мы такую схему без потери в качестве применить не сможем, так как при этом мы сразу получим недопустимые значения деформаций в ткани, которые приведут к сдвигу армирующих волокон, а, следовательно, к некачественному конструктивному материалу. В этом случае необходимо делать надрезы и таким образом снизить уровень деформаций. Компьютерная модель процесса выкладки позволяет учесть технологические особенности изготовления материала в расчетах прочности проектируемой конструкции, снизить количество допущений и идеализаций, значительно повысив точность результатов. На выходе мы получаем документацию в виде карт раскроя и альбома выкладки всего корпуса. Карты раскроя идут на специализированный станок с ЧПУ для раскроя ткани механическим способом. В итоге мы получаем нарезанные слои ткани различной формы с нанесенным обозначением и наименованием каждого слоя. В дальнейшем альбом выкладки используется

Лазерное оборудование, установленное на матрице для контроля укладки сухой ткани



Рис. 4. Численное моделирование технологического процесса выкладки ткани в оснастку

Моделирование пропитки углеткани связующим методом вакуумной инфузии (различными цветами показан фронт распространения связующего)



Подача смолы для пропитки сухой ткани и пенопласта

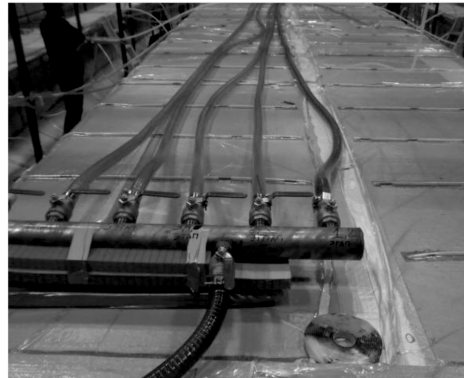


Рис. 5. Численное моделирование технологического процесса вакуумной инфузии

рабочими в цехе для укладки ткани в оснастку. Корпус катамарана имеет границы переходов различных пакетов слоев, которые должны быть видны рабочему, чтобы он правильно уложил слой. Для этой цели на матрицу монтируется лазерное 3D-оборудование, которое позволяет контролировать качество укладки (см. рис. 4).

Как уже было сказано корпус катамарана изготавливался методом вакуумной инфузии, который заключается в заполнении жидким связующим пор в армирующем материале, предварительно помещенный в вакуум. Далее происходит отверждение жидкой смолы. Чтобы избежать возникновения зон непропитки в изготавливаемом материале необходимо выбрать оптимальную для каждого элемента конструкции схему пропитки, которая выбирается, в том числе опытным путем — пропиткой опытных образцов. В случае с углетканью визуальный контроль движения связующего по опытным образцам затруднителен, к тому же, ввиду высокой стоимости углеткани изготовление таких образцов зачастую связано с серьезными денежными затратами. Поэтому особую роль приобретает численное моделирование процесса инфузии и предсказание зон непропитки в рамках виртуального эксперимента (рис. 5). С этой целью был освоен программный комплекс Pam RTM [4], способный проводить такие расчеты. Расчеты, проведенные в этой

программной среде, позволили в первом приближении оценить зоны непропитки элементов конструкции катамарана. Программный комплекс Pam RTM [4], моделирующий пропитку реализует математический аппарат на основе конечно-элементной аппроксимации.

Расчетный алгоритм базируется на законе движения жидкости в пористой среде — законе Дарси [5], который выражает линейную зависимость скорости фильтрации ньютоновской жидкости от коэффициента проницаемости пористой среды. В качестве результатов такого расчета могут быть получены следующие параметры: время пропитки всего изделия, расход смолы, зоны непропитки, образование макро- и микропор вследствие слишком низкой или слишком высокой скорости подачи связующего, время полимеризации (отверждения) и т. д. Можно отметить, что в зависимости от того пропитку какого изделия мы моделируем, нас интересуют определенные параметры. Если это крупногабаритное изделие, такое как корпус судна, то важно определить сухие зоны для выбора наиболее оптимальной схемы расположения проводящих трубок. Если это небольшое изделие серийного производства, то также важно точно предсказать время пропитки и полимеризации изделия для оптимального использования производственного времени, имеющейся оснастки и как следствие денежного ресурса.

Цикл рабочего проектирования изделий из ПКМ, применяемый на ОАО «СНЗ»



Корпус катамарана (пр.23290)



Рис. 6. Схема рабочего проектирования и корпус катамарана

В случае применения более традиционных судостроительных материалов (сталь, алюминий) с помощью расчетных комплексов, зная нагрузки и особенности эксплуатации, мы можем определить отклик конструкции на внешние воздействия и сделать выводы о его несущей способности. При этом мы используем некоторые постоянные механические свойства характерные для того или иного типа металла. В случае использования ПКМ технологический процесс создания материала становится неотделим от создания самой конструкции и напрямую влияет на механические характеристики, которые имеют очень большой разброс в зависимости от качества изготовления. Поэтому, моделируя весь жизненный цикл, мы можем минимизировать риски производства без потери в качестве, а также учесть те отклонения от расчетной модели, которые влияют на прочностные характеристики (например, сдвиги волокон, которые неизбежно возникают) анизотропного материала. Использование современных методов компьютерного моделирования позволяют это делать с приемлемой точностью. На рис. 6 показана схема рабочего проектирования и производства изделий из ПКМ. Обозначенные здесь программные продукты имеют интерфейсы для передачи электронной модели друг другу.

Заключение

При всей очевидной целесообразности использования средств компьютерного моделирования необходимо иметь верифицированные модели для достаточно точного описания реального процесса. Верификацию необходимо проводить с использованием опытных образцов. В случае описания технологического процесса вакуумной инфузии с помощью программы PamRTM [5] необходимо еще более углубленное экспериментальное исследование, так как численная погрешность остается достаточно ощутимой в этом случае. И если говорить о перспективах дальнейшей работы, то необходимо провести ряд испытаний для того, чтобы добиться лучшей сходимости. Однако, несмотря на это схема, показанная на рис. 6 помогает избежать множества проблем взаимодействия конструктора и

технолога, а также повысить качество создаваемой конструкции из ПКМ. Полученные таким образом результаты в значительной мере способствовали тому, что в итоге опытно конструкторская работа была реализована как полноценный проект судна.

Список использованных источников

1. Российский Морской регистр судоходства «Правила классификации и постройки высокоскоростных судов». 2008.
2. MSC/NASTRAN – Quick Reference Guide.
3. Справочные материалы программного комплекса FiberSim.
4. Pam-RTM – User's Guide and Tutorials.
5. Н. Е. Леонтьев. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009.
6. Р. В. Васильев, А. А. Родионов. Оценка критериев разрушения судовых конструкций при численном моделировании столкновения судов//Морские интеллектуальные технологии, № 2, 2011.
7. Р. В. Васильев, А. А. Родионов. Проблемы верификации расчетных моделей метода конечных элементов для решения задач глубоко пластического деформирования и разрушения конструкций//Материалы научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. СПб., 20-21 сентября 2013.
8. Р. В. Васильев, В. А. Коршунов, А. А. Родионов. Численное моделирование поведения деформируемой конструкции корпуса при движении судна в условиях волнения//XXV Международная конференция. Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Метод граничных и конечных элементов. 2013.
9. А. Ю. Софронов, Н. Н. Федонюк. Построение 3D-моделей формирования элементов корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов//Труды центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. Вып. 58. СПб., 2011.
10. О. Зенкевич, К. Морган. Конечные элементы и аппроксимация/Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
11. В. И. Анурьев. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. 5-е изд., перераб и доп. М.: Машиностроение, 1979.
12. Отчет по гос. контракту № 140505212-375-СН/30-2012 «Расчеты прочности скоростного катамарана из углепластика», 2013.
13. Det Norske Veritas. Rules for classification of high speed, light craft and naval surface craft. 2012.
14. DNV Classification Notes No. 30.8 Strength Analysis of Hull Structures in High Speed and Light Craft August 1996.

Application of modern computer simulation programs for the design and construction of high-speed passenger catamaran from carbon

R. V. Vasiljev, PhD, Chief Specialist for the calculation of strength, Sredne-Neviskiy Shipyard, JSC member of United Shipbuilding Corporation, JSC.

The article presents the application of computer simulation programs in preparing, designing and manufacturing of PCM products on the example of work on high-speed catamaran from carbon. Some results of numerical modeling of related technological processes and solving of design problems are illustrated. In conclusion some recommendations to improve efficiency are given.

Keywords: carbon, catamaran, strength, finite element method, manufacturing of PCM products.

Справка о предприятии:

ОАО «Средне-Невский судостроительный завод» одно из ведущих предприятий судостроительной отрасли России входящее в состав Объединенной судостроительной корпорации, объединяющей ведущие верфи страны. Основанный в 1912 г. на берегу Невы за сто лет своей непростой истории завод превратился в крупное, современное, высокотехнологичное предприятие. За более чем 100 лет работы завода построено более 500 кораблей и судов по 43 проектам.

На сегодняшний день Средне-Невский судостроительный завод является одним из ведущих предприятий судостроительной отрасли России, специализирующихся на строительстве кораблей и судов нового поколения из стеклопластика с использованием новейших технологических достижений и разработок. В 2004 г. завод был включен в Федеральную целевую программу «Развитие оборонно-промышленного комплекса», благодаря чему получил финансовую поддержку для реконструкции основных фондов. Также завод вошел и в Федеральную целевую программу «Научно-технологическая база», в рамках которой приступил к созданию опытного производства для отработки технологий изготовления судокорпусных конструкций из полимерных материалов. На заводе освоены новейшие технологии постройки корпусов вакуумным методом — методом инфузии. Предприятие является единственным в России, где возможно строительство монолитных корпусов кораблей и судов из стеклопластика длиной до 70 м.

За последние 5 лет на предприятии проведен большой комплекс опытно-конструкторских работ направленных на разработку новых полимерных композиционных материалов, разработку технологий изготовлений крупногабаритных конструкций и модернизацию производства. Все работы проводились совместно с ведущими отраслевыми научными центрами: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», а также совместно с ведущими проектными организациями: ОАО «ЦМКБ «Алмаз», ОАО «ЦТСС», ОАО «ЦКБ «Нептун» и др.

Завод являлся головным исполнителем ОКР, проводимых в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг.».