

# Постановка задачи проектного обоснования подсистемы «Корпус» судна из композиционных материалов

В условиях рыночной экономики одной из главных задач в проектировании судов становится повышение конкурентоспособности проекта. Это требование может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

- Повышения качества проектных работ, особенно на ранних стадиях проектирования;
- Уменьшения издержек на многовариантные проработки;
- Сокращения общих сроков выработки проекта.

Для современной техники характерно применение композиционных материалов.

Судостроение использует композиты уже достаточно давно. Первые суда из стеклопластика были изготовлены во второй половине 30-х годов прошлого века. С 50-х годов стеклопластиковое судостроение получило широкое распространение в мире.

В последние годы все чаще происходит замена традиционных судостроительных материалов полимерными композитами. Их применение позволяет, наряду с обеспечением высоких эксплуатационных показателей, существенно снизить массу корпуса судна.

Сегодня композитное судостроение стало быстро развивающейся обособленной отраслью. Применение этих материалов позволяет значительно сократить сроки строительства судна по сравнению с деревянным и металлическим судостроением. Кроме того, оно допускает использование существенно менее квалифицированной рабочей силы. Все это обуславливает серьезную экономическую мотивацию для развития массового судостроения из композитов. Мировой судостроительный опыт свидетельствует о высокой экономической эффективности производств, на которых создаются судовые корпусные конструкции из композиционных материалов, и о высоких потребительских качествах современных судов из композитов.

Первоначально конструкции стеклопластиковых судов воспроизводили конструкцию судов из традиционных материалов. По мере накопления опыта постройки, дизайн стеклопластиковых судов приобретал специфические черты. Применение композиционных материалов позволяет



**Михаил Францев**  
инженер-кораблестроитель, к. т. н.

создавать суда с высокими аэро- и гидродинамическими характеристиками, с легкими надстройками, эффектным дизайном внешнего облика и рядом других достоинств.

Сегодня большую часть мирового малотоннажного промышленного, служебно-разъездного и прогулочного флота составляют суда, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов. Однако в современной России служебные, разъездные и промышленные суда из композиционных материалов, имеющие в мировом



Однокорпусное судно специального назначения переходного режима движения, полностью из композиционных материалов.



флоте массовый характер, проектируются и строятся в весьма ограниченных количествах.

Несмотря на это, отечественное судостроение по-прежнему располагает огромным потенциалом в области науки и технологий. В последние годы существенное развитие получили такие направления, как создание сферопластиков – материалов, способных, обеспечивая плавучесть, выдерживать очень высокие давления; разработка ряда перспективных конструкционных полимерных материалов на основе экологически безопасного бесстирольного полиэфирного связующего для различных судов гражданского назначения; создание экологически чистых, нетоксичных и пожаробезопасных, теплоизоляционных и конструкционно-отделочных материалов на базе композитов для оборудования внутренних помещений судов всех классов и назначений в соответствии с международной конвенцией «SOLAS-74», международными требованиями ИМО и рядом других документов.

В то же время, в результате накопившихся проблем, в отечественном судостроении возникла ситуация, когда между отработанными техническими решениями, применяемыми в отечественных проектных организациях при разработке проектов судов, и достижениями мировой науки образовался разрыв, приводящий к возрастающему отставанию отечественного судостроения от мирового уровня. Это приводит к переориентации ряда отечественных судовладельцев и операторов на продукцию зарубежного судостроения.

Для расширения возможностей создания отечественных судов из композиционных материалов в настоящее время необходимо решить ряд проблем, как в области совершенствования проектных характеристик судов, их оптимизации, так и в области улучшения структуры всего процесса проектирования. Необходимо совершенствование методов проектирования из композитов, используемых в отечественном судостроении, для создания конкурентоспособных современных архитектурно-компоновочных и конструктивных решений для судов.

Известно, что судно – многоуровневая система. На первом уровне декомпозиции судно рассматривается как совокупность подсистем, выделяемых по функциональному признаку, например, «Корпус», «Гидродинамический комплекс» и другие. Иерархия подсистем определяется их доминантностью, степенью влияния свойств той или иной подсистемы на качество в целом.

Процесс рационального обоснования объектов при проектировании судна заключается в обеспечении рациональных характеристик системы в целом, путем придания определенных свойств отдельным ее подсистемам. При этом изменение свойств каждой из подсистем в той или иной степени влияет на изменение общих характеристик. В свою очередь, соответствие системы определенным требованиям обуславливает определенные свойства ее подуровней. «Корпус» является доминирующей подсистемой по отношению ко всем остальным. [1, 2, 3, 7]

Рассмотрим специфику постановки задачи проектного обоснования подсистемы «Корпус» судна из композиционных материалов. При этом ограничим круг рассматриваемых проблем исключительно спецификой применения композита.

Масштабное использование этих материалов в качестве основы конструкции судовых корпусов, особенно в скоростном малотоннажном судостроении, привело к тому, что, по мере накопления опыта проектирования, строительства и эксплуатации судов из композитов, конструкция их корпусов стала существенно отличаться от конструкции корпусов судов из традиционных материалов. Началась трансформация - от системы пластин и стержневых конструкций к объемным многослойным оболочкам.

Сегодня можно говорить о существовании принципиально новой конструкции корпуса из композитов, наилучшим образом использующей некоторые положительные качества этих материалов. Сегодня композитный корпус судна – это система поверхностей, образующих объемно-прочную конструкцию. И корпус без палубы, и палуба без корпуса не обладают достаточной прочностью и жесткостью. Только после соединения в единое целое, установки в контур продольных и поперечных переборок, они приобретают необходимый набор качеств. При этом каждая из поверхностей корпуса и палубы имеет свой набор механических свойств. Эти свойства могут изменяться, как по толщине поверхности, так и по ее площади. [5]

Судовые корпуса из композитов формируются из материалов, состоящих из нескольких компонентов и имеющих гетерофазную структуру с поверхностью раздела фаз. Для конструкционных композиционных материалов характерны следующие признаки:

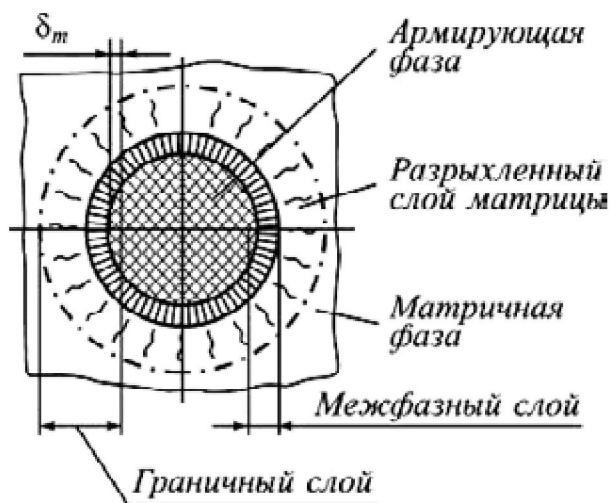
- Состав и форма компонентов материала определены заранее;
- Компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;



- Материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе (компоненты различаются по свойствам, между ними существует явная граница раздела).

Армированные композиты – это материалы искусственного происхождения, имеющие не менее двух непрерывных фаз с общей границей раздела. Одна из фаз называется матрицей, она обеспечивает форму изделия, устойчивость композита к воздействию различных агрессивных сред, тепло- и морозостойкость, ударную прочность и другие свойства. Полимерной основой матрицы является связующее, превращающееся в матрицу после соответствующей обработки. Важными характеристиками связующего являются его технологические свойства: вязкость, смачивающая способность, живучесть и др. Требования к физико-механическим свойствам связующих определяются условиями эксплуатации изделий из композитов.

Весьма важны и их технологические свойства, от которых зависит возможность производства композиционного материала. Так, например, вязкость связующего оказывает непосредственное влияние на возможность пропитки им наполнителя, а адгезионные свойства влияют на прочность связи между наполнителем и матрицей. Температурный коэффициент линейного расширения, который у матрицы может быть в десятки раз больше, чем у волокна, влияет на возможность расслоения композита уже при изготовлении изделия, поскольку отверждение большинства используемых полимеров происходит с выделением тепла.



Модельное представление о межфазном слое в системе матрица – армирующий материал

Второй обязательной фазой композиционного материала является армирующий наполнитель, частицы которого должны иметь длину не менее критической, при которой может быть реализована прочность волокна. Критическая длина волокна зависит от его диаметра, прочности при разрыве, прочности при сдвиге на границе раздела «волокно–матрица». [4]

Наибольшее распространение в современном судостроении получили армированные полимерные композиты с использованием текстильных материалов на основе стекловолокна в качестве арматуры, что связано с его доступностью, низкой стоимостью и высокими прочностными свойствами. Увеличение требований к армированным материалам привело к использованию в полимерных композитах сначала углеродных, а позднее органических высокомодульных волокон типа СВМ и кевлар. Эти высокопрочные армирующие материалы получили широкое распространение в современном судостроении.

Как было сказано выше, подсистема «Корпус» является доминирующей по отношению к другим подсистемам судна первого уровня. Специфической особенностью принципиально отличающей процесс проектирования судна из композиционных материалов от проектирования судна из традиционных материалов является невозможность корректной декомпозиции подсистемы «Корпус» на подсистемы более низкого порядка на начальном этапе проектирования.

Одной из центральных задач конструирования изделия из композиционных материалов является правильный подбор полимерной композиции, обеспечивающий сочетание свойств, необходимых в конкретном эксплуатационном случае. При конструировании армированных полимерных композиционных материалов широко используется компьютерная обработка данных, для чего разработано большое количество разнообразных программных продуктов. Их использование позволяет повышать качество продукции, сокращать длительность разработки и организации производства конструкций, комплексно, качественно и быстро решать задачи их рационального проектирования. При расчете состава и структуры композиционного материала и изделия, изготовленного из него, могут быть использованы эмпирические формулы и различное программное обеспечение.

Расчеты, выполненные при проектировании материала и изделия, базируются на известных для соответствующих материалов характеристиках и их зависимостях от тех или иных

параметров состава и структуры армированного композиционного материала. При разработке судовой корпусной конструкции из композита одновременно решаются три связанных задачи:

- Разработка способа применения самого композита в виде законченной конструкции и определение ожидаемых технических и других качеств;
- Выбор исходных компонентов композита;
- Разработка технологии изготовления изделия. [5, 6]

Соотношение между суммой затрат на решение этой триединой задачи и полученными в результате качествами конструкции определяет целесообразность применения того или иного композиционного материала.

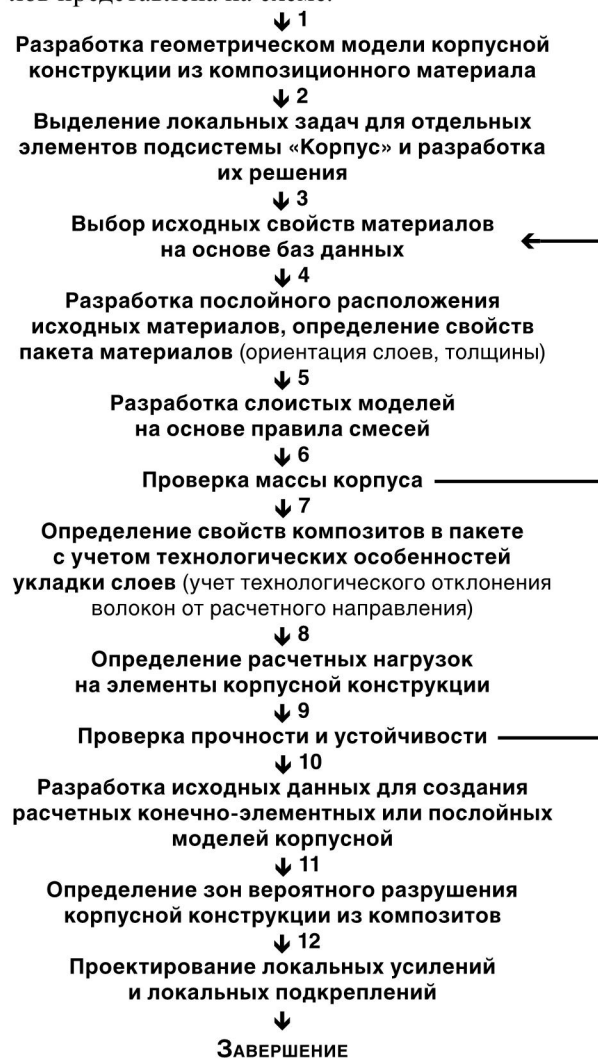
Использование армированных композитов позволяет разработчику при проектировании судна одновременно конструировать и материал. В рамках заданных технических требований к композиционному материалу проектируется его состав и структура. Они определяют, во-первых, выбор его полимерной основы, отвердителя и катализатора отверждения, а также их соотношения в составе связующего. Во-вторых, определяются тип и природа армирующего материала и схема армирования. Для композитов, имеющих в своем составе непрерывный наполнитель в виде волокна, нетканого полотна (мата) или ткани, характерна значительная анизотропия механических свойств.

Наибольшее различие свойств проявляется в однонаправленных армированных материалах. Для стеклопластиков прочность вдоль волокон больше прочности поперек волокон примерно в 50 раз. Такие свойства композитов, как существенно более высокий температурный коэффициент линейного расширения по сравнению с металлом, низкая жесткость и недостаточная усталостная прочность при изменяющихся нагрузках также существенно отличаются от характеристик традиционных для судостроения материалов. Поэтому правильный выбор рецептуры связующего и схемы армирования, с учетом условий эксплуатации и прилагаемых нагрузок, позволяет многократно увеличить эксплуатационную долговечность конструкции.

Регулируя состав связующего, тип наполнителя и схему армирования, возможно уже на стадии проектирования материала создать предпосылки для получения изделия с необходимыми эксплуатационными характеристиками. Учет неравномерности нагрузок позволяет проектировать судовую корпусную конструкцию из армированного композита с дифференцированной толщиной, которая может изменяться в десятки раз.

Неразрывно связана с ожидаемыми свойствами композиционного материала судовой корпусной конструкции и технология его изготовления. Правильно разработанный технологический процесс постройки судна из полимерных композиционных материалов в ряде случаев более экономичен, чем постройка этого же судна из традиционных материалов. Одним из актуальных для такого рода производств является вопрос: насколько оправданными будут затраты, связанные с изменением или разработкой нового полимерного композиционного материала, а также технологического процесса его производства. [4]

Последовательность рассмотрения проектных обоснований при проектировании подсистемы «Корпус» судна из композиционных материалов представлена на схеме.



Ниже изложены основные принципы, локальные задачи, модели и методы, применяемые при проектировании судовых конструкций из





композиционных материалов, реализуемые современными программными средствами вычислительной техники:

### 1. Основные принципы, применяемые при разработке моделей конструкций из композиционных материалов:

- При моделировании применяется теория тонких слоистых оболочек;
- При моделировании конструкции она может рассматриваться в виде группы оболочечных элементов;
- Конструкция из композита представляется в виде идеально склеенного набора слоев (толщина клевого слоя равна нулю, нет проскальзывания между слоями);
- Каждый слой конструкции имеет собственную ориентацию волокон;
- Каждый слой конструкции имеет собственную толщину;
- Каждый слой имеет собственную ориентацию в пространстве механических характеристик (изотропию, ортотропию или анизотропию).
- При детализации модели описываются системы координат слоя и пакета.

### 2. Локальные задачи, возникающие при разработке корпусных конструкций из композиционных материалов:

- Моделирование оболочечных и балочных конструкций из композиционных материалов;
- Моделирование массивных элементов корпусных конструкций из композитов;
- Оптимизация массы конструкции;
- Нелинейные решения, прогрессирующее разрушение (статика, динамика), потеря устойчивости (линейная и нелинейная постановки);
- Моделирование процесса затвердевания (решение связанной задачи, расчет пружинения);
- Трехмерный контакт тел произвольной формы;
- Моделирование процессов формования;
- Решение задач о разрушении от воздействий ударного (взрывного) характера;
- Решение задач динамики;

### 3. Разработка послойного расположения в модели конструкции из слоистого композиционного материала включает:

- Определение свойств материала каждого из слоев;
- Определение количества слоев;
- Определение толщины каждого из слоев;
- Определение ориентации волокон в слоях.

### 4. Определение свойств композитов в пакете с учетом технологических особенностей укладки слоев (учет технологического отклонения волокон от расчетного направления) включает:

- Определение вероятного отклонения волокон от начального направления за счет кривизны поверхности, способа укладки волокна в форму и свойств исходных материалов;
- Расчет вероятного угла отклонения волокон от первоначального направления в каждой точке на поверхности формы.

### 5. Моделирование укладки слоев:

- Определение площади поверхности;
- Расчет выкройки;
- Определение положения складок;
- Определение разрезов.

### 6. Принципы моделирования укладки слоев:

- Волокна основы и утка материала не изменяют длину;
- Трение ткани о поверхность формы отсутствует;
- Размер ячейки ткани (расстояние между «узлами») в процессе моделирования кладки не меняется.

### 7. Принципы расчета массивных элементов корпусных конструкций из композитов:

- Для расчета массивных композитов применяются трехмерные элементы, в которых для каждого слоя в процессе расчета используется свой набор точек интегрирования;
- Решение в осесимметричной постановке, моделирование плоского напряженного и плоского деформированного состояний;
- Описание свойств композитного материала в трехмерной постановке.

### 8. Слоистые модели композитов на основе правила смесей рассматриваются в следующей иерархии:

- Слоистая оболочка;
- Пакет слоев;
- Дисперсный наполнитель;
- Волокна или стержни.

### 9. Моделирование композиционных материалов на основе правила смесей с использованием линейной и нелинейной моделей:

- В линейных моделях принят тип смешивания, при котором новые упругие и тепловые константы вычисляются по константам исходных материалов на основе процентного содержания матрицы и волокна, после чего производится построение новых кривых деформирования;
- В линейных моделях производится поддержка свойств, зависящих от температуры, линейные модели применяются для двух- и трехмерных элементов;
- Особенностью нелинейной модели является построение моделей на основе нелинейных кривых деформирования материалов, которые входят в состав композиции;

## ■ Экспертное мнение

- В процессе расчета композит, построенный на основе правила смесей, может разрушаться по теориям, используемым при расчете разрушения материалов – компонент;
- В нелинейных моделях возможно построение упругопластических моделей.

### 10. Разработка процесса затвердевания:

- Моделирование процесса затвердевания представляет собой процесс решения связанной термомеханической задачи, которая позволяет определять возможные механические проблемы.
- Расчет пружинения – изменения формы изделия после окончания основных процессов полимеризации и остывания является сложной задачей, включающей расчет остаточных напряжений и расчет остаточных деформаций.

### 11. Методы расчета разрушения конструкций из композиционных материалов:

- Линейная механика разрушения;
- Разрыв клеевого соединения;
- Нелинейная механика разрушения;
- Макромеханическая модель разрушения;
- Микромеханическая модель разрушения.

Изложенный выше круг вопросов, безусловно, не исчерпывает всего перечня проектных обоснований, связанных с проектированием судна из композитов, их выполнение в объеме данного круга вопросов позволяет подготовить исходную информацию для разработки проектной документации современного судна из композиционных материалов.

#### Литература:

Ашик В.В. Проектирование судов. Л., Судостроение, 1985, – 486 с.

Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. – СПб, Судостроение. 2001, 264 с.

Пашин В.М. Оптимизация судов. Л., Судостроение, 1983, – 286 с.

Тарнопольский Ю.М. и др. Пространственно-армированные композиционные материалы, Справочник, М, Машиностроение, 1987. – 223 с.

Францев М.Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов, Морской вестник №4(28) 2008, стр. 93–98.

Х дю Плесси. Малотоннажные суда из стеклопластика, Л, Судостроение, 1979, 344 с.

Царев Б.А. Оптимизационное проектирование скоростных судов. Л., ЛКИ, 1988, 102 с.





**БЛОКФОРМ**  
ПЕНОПОЛИУРЕТАНЫ

www.blockform.ru



Уникальные разработки

Современные технологии

**Крупный производитель компонентов ППУ для теплоизоляции и гидроизоляции**

- Гидро- и теплоизоляционные материалы
- Полиуретановые клеи, лаки, покрытия
- Трубки, шланги, жгуты из термопластичного полиуретана  
Повышенная износостойкость, устойчивость к агрессивным средам
- Поролон специальных марок
- Сорбент для сбора нефтепродуктов
- Заливочные и напыляемые системы компонентов  
Применяются для утепления и заполнения плавучих станций, понтонов.  
Система Уремикс 401 одобрена речным регистром

600016, Владимир, Большая Нижегородская, 77  
отдел сбыта: +7 (4922) 53-39-95, тел. в Москве: +7 (495) 542-67-95  
факс: +7 (4922) 33-10-73 sales@blockform.ru

Реклама

Есть даже то, чего нет  
**МЕЧТА СНАБЖЕНЦА**



**ПЕТРОСНАБ**

**цветной металлопрокат**  
Санкт-Петербург, Минеральная, 13<sup>А</sup>  
(812) 327-66-66

Алюминий	Лист
Медь	Лента
Латунь	Трубка
Бронза	Пруток
Сплавы	Проволока

от 1 грамма,  
от 1 сантиметра

info@petrosnab.ru  
www.petrosnab.ru



Реклама