

УДК 629.12

Назаров Альберт Георгиевич¹, к.т.н., генеральный директор,
e-mail: nydesign@yandex.ru

¹ООО АН Марин Консалтинг, г. Москва, Россия.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассматриваются преимущества и сдерживающие факторы применения композиционных материалов в судостроении. Представлена систематизация существующих методов расчетов прочности, обозначена инженерная и нормативная практика. Даны рекомендации по совершенствованию российских нормативных документов.

Ключевые слова: композиционные материалы, малые суда, высокоскоростные суда, прочность, конструктивная противопожарная защита

В современном судостроении активно происходит процесс перехода от металлических конструкций к полимерными композиционными материалам (КМ). Наиболее распространение КМ получили в малом (т.е. длиной $L < 24$ м) и высокоскоростном судостроении: на сегодняшний день до 90% малых судов прогулочного назначения строятся именно из КМ. Известны примеры постройки из КМ судов длиной до 60...70 м.



Рисунок 1 – Серия 16-метровых высокоскоростных катеров из КМ для береговой охраны Республики Мальдивы (проект автора)

Преимущества и сдерживающие факторы применения КМ

Одним из преимуществ КМ является высокая технологичность серийной постройки при сравнительно низкой стоимости производства [1]. Например, на рис.1 показаны 16-метровые катера из КМ, отформованные методом инфузии; изготовление партии из четырех таких катеров занимает три месяца; подобные темпы постройки недостижимы

для судов из металла. Высокие темпы постройки необходимы для обеспечения рынка РФ эффективными судами для внутреннего туризма в условиях импортозамещения.

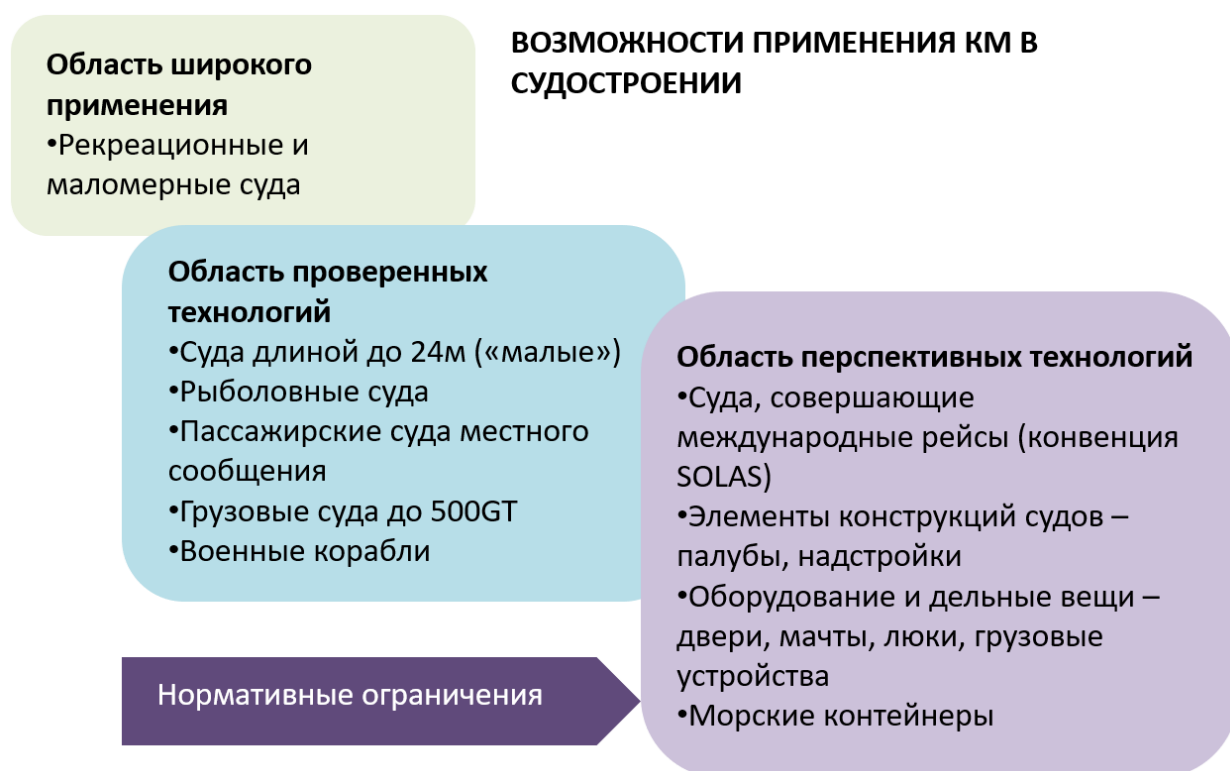


Рисунок 2 - Возможности применения КМ в судостроении

Основным сдерживающим фактором для КМ следует признать ограничения на негорючесть материала корпуса, накладываемые рядом нормативных документов. Основной источник этих ограничений – конвенция СОЛАС, которая, строго говоря, распространяется только на суда, совершающие международные рейсы. Однако в практике РФ эти требования введены в Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта, Российского морского регистра (РС), а также в правила Речного Регистра (РРР) для пассажирских судов категорий О-ПР и выше. В то же время в зарубежной практике, пассажирские суда местного сообщения широко строятся из КМ, что повышает их доступность и привлекательность для бизнеса, и является областью проверенных технологий (рис.2). Касательно перспективных технологий, рядом консорциумов (LASS, FibreSHIP и др.) ведутся НИОКР для применения КМ в «конвенционной» зоне.

Существующие методы оценки прочности

В настоящее время в проектировании судов из КМ принято рассматривать следующие задачи прочности:

- Местная прочность – когда при идеализации конструкции рассматриваются отдельные пластины и балки набора;
- Общая прочность – рассматривается общая деформация корпуса, при продольном и поперечно изгибе, скручивании и т.д.;
- Прочность элементов – например, фундаментов механизмов.

Подобное разделение доказало свою работоспособность, оно весьма условно; современные методы позволяют анализировать сложные комбинированные случаи нагрузок, что и выполняется для наиболее ответственных проектов из КМ.

Существует несколько групп методов оценки прочности судов, которые применяются в нормативных документах и практике проектирования:

- a) Выбор элементов конструкции по судну-прототипу - применяется в некоторых руководствах, например издаваемых FAO [2] для постройки малых промысловых судов.
- b) Директивный - заключается в назначении шпации, толщины обшивки и т.д., применяется у РС [3] для прогулочных судов. Некоторые рудименты этого подхода можно обнаружить в правилах PPP и РС, а также РД [12], где до сих пор содержатся требования к директивной шпации.
- c) Упрощенный метод расчетов, когда используются статистические формулы и таблицы, пригодные для низко технологичных КМ; метод содержит высокие запасы прочности.
- d) Квази-изотропный, в котором свойства КМ, и расчеты выполняются как для конструкции из изотропного материала; применяется для однослойных КМ на основе стекломата (CSM) и ровинга (WR), например, как один из вариантов в ISO [4,5].
- e) Пакетный - основан на представлении пластины обшивки, балки набора или сечения корпуса судна в виде пакета материалов, с расчетом комбинированных характеристик жесткости.
- f) Классическая теория ламинатов (CLT) - метод аналогичен предыдущему, но позволяет более достоверно рассчитывать несбалансированные КМ. Основана на представлении пластины из КМ в виде ортотропных слоев, вычислении матриц жесткости и инженерных констант.
- g) Метод конечных элементов (МКЭ) основан на численном моделировании конструкции.
- h) Методы испытаний судна - сбрасывание, налив воды, постановка на опоры и т.д.

Таблица 1 - Применение методов расчета конструкций из КМ в судостроении

Методы расчета	ISO12215-5		DNV		LR SSC [8]
	2008/2014 [4]	2019 [5]	0342[6]	HSLC [7]	
Применение	L _H <24м			Без ограничений размера	
Упрощенный	МП L _H <9м	-	МП	-	-
Квази-изотропный	МП	МП	-	-	-
Пакетный	МП, ОП	МП, ОП	-	-	МП
CLT	-	МП	-	МП	-
МКЭ	ОП	МП, ОП	-	МП, ОП	ОП
Испытания судна	Сбрасывание L _H <6м		-	-	-

МП - местная прочность, ОП - общая прочность, L_H – длина корпуса

Большинство зарубежных стандартов и классификационных обществ (КО) применяют в своей практике методы «d»-«g» (см.табл.1). Касательно метода испытаний, его применимость к судам из КС подробно рассмотрена автором в [9] - метод мог бы быть внедрен в практику КО для судов небольших размеров.

Российская нормативная практика

В отличие от зарубежных КО, PPP [10] не содержит четкой методики расчета конструкций из КМ. Приведены лишь требуемые критерии и запасы прочности, и общие указания по выполнению расчетов; усложняет задачу требование обязательной сертификации программного обеспечения. РС традиционно имел в составе правил раздел по судам из стеклопластика, основанный на «директивном» подходе «b». С 2018 введены новые правила РС [11] содержащую методику расчета, основанную на комбинации

методов «d» и «e». Однако, в начале 2021 вышел бюллетень изменений, содержащий 43 страницы корректировок, в том числе изменениям подверглась значительная часть формул и графиков. Очевидно, что говорить о работоспособности этих методик пока рано, тем более, что сам метод предлагается как "рекомендательный". Более разумно пользоваться опробованными на практике методами, при этом используя критерии прочности и расчетные нагрузки из РС. При этом следует отметить, что случаи постройки судов из КМ под РС на сегодняшний день крайне редки, что пока не дает развитой статистической базы для совершенствования правил.

Говоря о российской нормативной практике, следует также упомянуть РД51186-90 [12], который содержит методы расчета конструкций из КМ. При этом, пластины и оболочки трехслойных конструкций рассматриваются как де-факто изотропные, что в современных проектах применяется редко. В целом, документ устарел и использовать его как для практических расчетов, так и для разработки новых нормативных документов нецелесообразно.

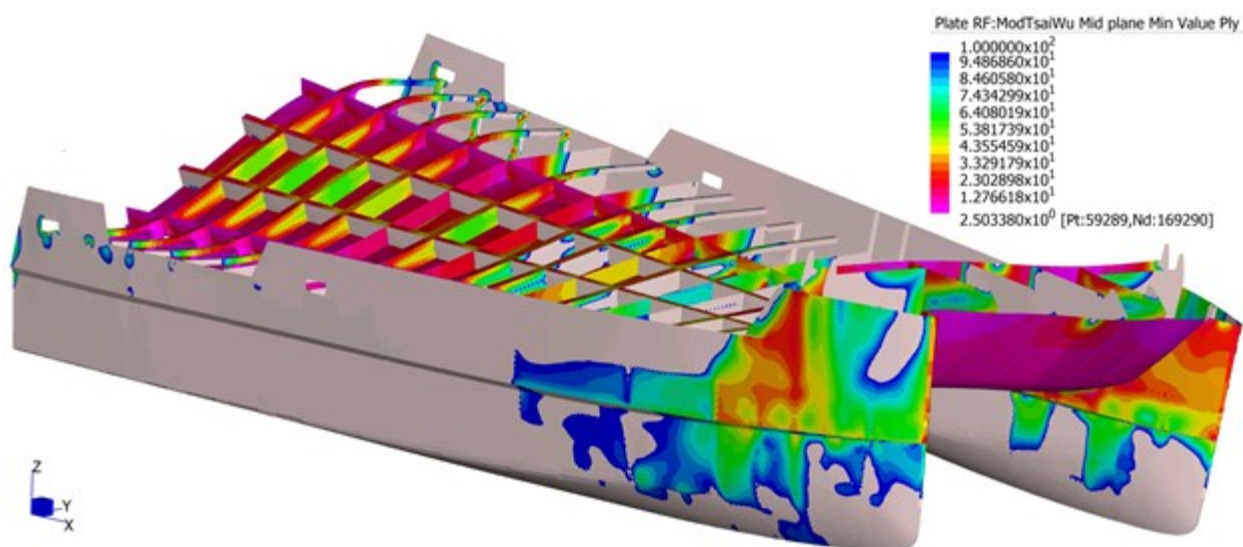


Рисунок 3 – Применение МКЭ для расчета общей прочности катамарана пр.Е24 длиной 24м при скручивании относительно поперечной оси.

Инженерная практика АНМК

В практике АНМК используется комбинация "пакетного" e) и CLT f) методов с МКЭ g), где для оценки местной прочности используется двухмерный "ортотропный" подход, а для узкоспециальных задач общей прочности, прочности фундаментов и т.д. применяется трехмерный подход с МКЭ (рис.3,4).

Несмотря на то, что на рис.3 представлена модель корпуса целиком, практика показывает, что в большинстве задач общей прочности катамаранов достаточно ограничиться анализом мостовой конструкции (так называемый «плот»), заменяя корпуса жесткими связями. Это существенно снижает время на моделирование и отладку, и обеспечивает запас в безопасную сторону при расчете. Как правило, расчет общей прочности катамаранов и однокорпусных судов длиной до 24м типовых пропорций является проверочным, а общая прочность обеспечивается по умолчанию при обеспечении местной.

На рис.4 показано использование МКЭ для расчета прочности кормовой части катамарана длиной 12 метров модели TV400GFX, разработанного для компании из США, производящей суда для спортивной рыбной ловли в океанских условиях. В связи с установкой на судне четырех подвесных двигателей высокой мощности, дополнительный

анализ потребовался для транцевой части судна, при этом расчетные нагрузки от креплений определены согласно [13]. Показана расчетная модель кормовой части со связью типа «симметрия» в диаметральной плоскости судна, и результат расчета минимального коэффициента запаса RF по напряжением.

В настоящее время, АНМК разработана и проходит сертификацию КО программа Sigma-LAM, предназначенная для расчетов конструкций из КМ, реализующая пакетный метод расчета «е». Программа позволяет выполнять расчеты по критериям местной прочности РС [11] и ISO12215-5 [5].

Выводы

Основными сдерживающими факторами применения КМ в судостроении в РФ являются невыполнимые для большинства судов требования конструктивной противопожарной защиты, а также отсутствие четких нормативных методов проектирования современных конструкций из КМ.

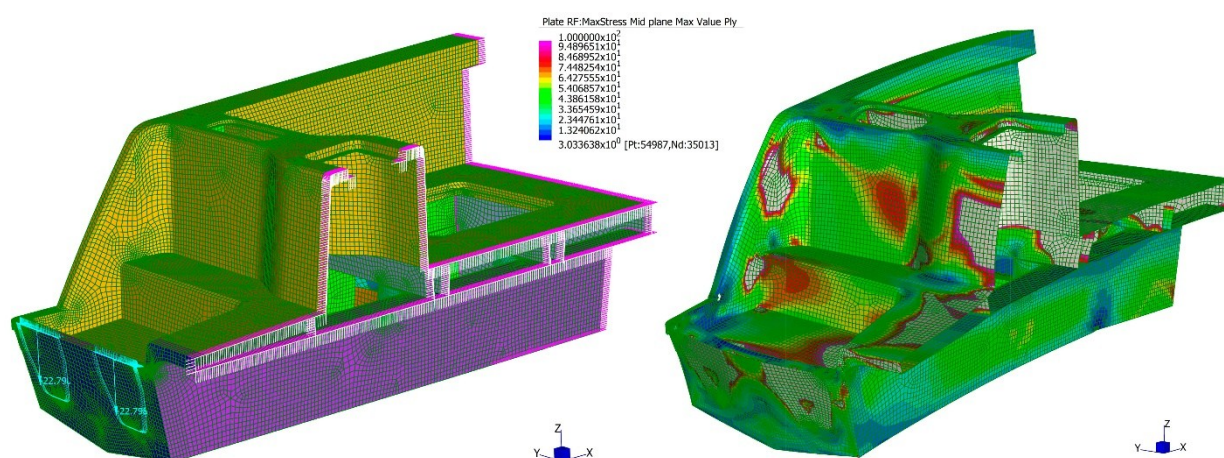


Рисунок 4 – Применение МКЭ для расчета прочности транца катамарана пр. TV400GFХ длиной 12м на нагрузку от подвесных моторов.

На сегодняшний день АНМК накоплен значительный опыт проектирования и эксплуатации конструкций реализованных проектов судов из КМ различного назначения длиной до 33м. В работе находятся несколько проектов, в том числе суда для внутреннего туризма, перевозки пассажиров, рыболовные и т.д.

В российской практике, ограничения на использование «несертифицированного» программного обеспечения делает невозможным инженерный анализ конструкций из «продвинутых» композитов, вынуждая проектантов использовать простейшие схемы армирования из квази-изотропных материалов, и не позволяет добиваться максимального эффекта от снижения массы конструкций. Разрабатываемое АНМК программное обеспечение частично решает эту проблему.

Несомненно, в новых условиях технологическое развитие, развитие транспорта и внутреннего туризма приобретают приоритетное значение, и барьеры для применения КМ в судостроении должны быть пересмотрены.

Список литературы:

1. Nazarov A. Composite High Speed Craft: Practical Design Approaches// 4nd Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2014.
2. Fishing boat construction: 2. Building a fibreglass fishing boat. FAO Fisheries technical paper 321. Food and Agriculture Organization of the United Nations.1991.

3. Правила классификации и постройки морских прогулочных судов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2018.
4. ISO-12215 - 5:2008 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5 design pressures, design stresses, scantling determination.
5. ISO-12215 - 5:2019 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5 design pressures, design stresses, scantling determination.
6. DNV-GL Standard 0342 – Craft, 2016.
7. Rules for Classification of High Speed and Light Craft. DNV– 2020.
8. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd’s Register, 2020.
9. Nazarov A., Tapee S., Prapset P., Chattawan S. Small Craft Design for Drop Test: Case Study // SURV 10 - Surveillance, Search and Rescue Craft, 13-14 January 2021, RINA, London
10. Правила классификации и постройки судов. Российский Речной Регистр, 2022.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2022.
12. Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Правила проектирования и методические указания по расчетам прочности. РД5.1186-90
13. Guidelines for Commercial Craft. VTT. Version 2016-2.

PROBLEMS OF DESIGNING BOATS IN COMPOSITE MATERIALS

Albert G.Nazarov

Annotation. The advantages and constraints of the use of composite materials in shipbuilding are considered. A systematization of existing methods for calculating strength is presented, engineering and regulatory practices are indicated. Recommendations for improving Russian regulatory documents are given.

Keywords: composite materials, small craft, high speed craft, strength, structural fire protection.