

УДК 629.5.022.2

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СКЛЕИВАНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ КАТАМАРАНА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Пентегов Андрей Сергеевич¹, магистрант

e-mail: ap.anmarineconsulting@yandex.ru

Назаров Альберт Георгиевич¹, кандидат технических наук

e-mail: anmarineconsulting@yandex.ru

¹ ООО АН Марин Консалтинг, Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается численный метод оценки прочности клеевых соединений катамарана сборной конструкции, изготавливаемого из полимерного композиционного материала. Соединительные швы на основе клеевого компаунда участвуют в обеспечении общей прочности судна. Рассмотрены режимы разрушения клеевых швов, расчетные нагрузки, приведена схема МКЭ-моделирования, результаты расчета напряжений. Сделаны выводы о применимости и критических факторах соединений.

Ключевые слова: клеевое соединение, композиционный материал, общая прочность, метод конечных элементов.

ANALYZING THE APPLICABILITY OF BONDING IN ENSURING THE GLOBAL STRENGTH OF A CATAMARAN MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Andrei S. Pentegov¹, Master's Degree Student

e-mail: ap.anmarineconsulting@yandex.ru

Albert G. Nazarov¹, Candidate of Technical Sciences

e-mail: anmarineconsulting@yandex.ru

¹ ООО AN Marine Consulting, Moscow, Russia

Abstract. A numerical method for evaluating the strength of adhesive joints of a prefabricated catamaran made of polymer composite material is considered. Adhesive compound-based joints are involved in ensuring the overall strength of the vessel. Failure modes of adhesive joints, design loads, FEM modeling scheme, stress calculation results are considered. Conclusions about applicability and critical factors of joints are made.

Keywords: adhesive joint, composite material, global strength, finite element method.

Введение

Суда катамаранного типа имеют возрастающее значение для пассажирских перевозок в РФ. Причиной тому являются их непревзойденная безопасность и комфорт,

обеспечиваемый благоприятными параметрами качки и просторными помещениями. Однако значительная ширина катамаранов часто становится причиной, сдерживающей их транспортировку на отдаленные водоемы. В последние годы ряд производителей в РФ использовали схему со сборкой катамаранов на месте эксплуатации. Например, в 2011г. элементы пассажирских катамаранов пр.РМ1800 из стеклопластика доставлялись из Владивостока в Санкт-Петербург с последующим соединением секций в виде клееболтового соединения. Для элементов алюминиевых катамаранов пр.НСВ150 (2024г.) применялась доставка из Рыбинска на Байкал, со сборкой сваркой на месте.

Существенным усовершенствованием процесса сборки катамарана может стать исключение сварки и вторичного формования. Так, при создании катамаранов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) может быть использован метод склеивания секций клевым компаундом, что обеспечит перевозку элементов судна к месту сборки железнодорожным транспортом или в контейнерах. Подобные компаунды широко применяются для приклейки элементов набора и секций в композитном судостроении.

Целью настоящей работы является повышение эффективности производства судов катамаранного типа за счет оптимизации процесса их доставки потребителям. В ходе работы решались задачи формирования геометрии соединения, анализа возможных механизмов разрушения клеевого слоя и расчетной оценке действующих в клеевом слое напряжений.

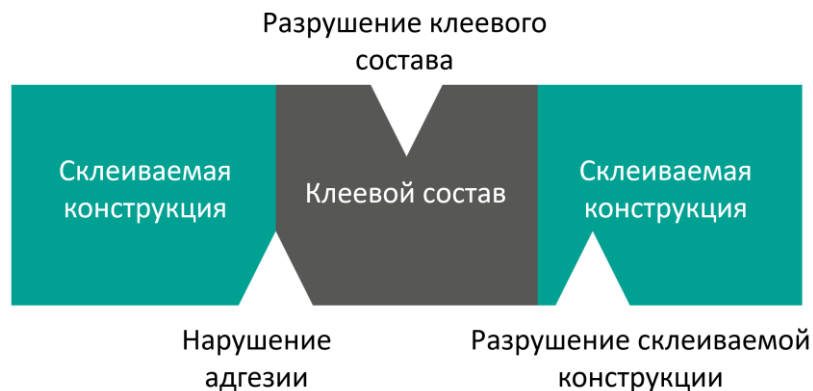


Рисунок 1 – Возможные механизмы разрушения клеенной конструкции

Анализ механизмов разрушения склеиваемых конструкций

Систематизация данных производителей клевых компаундов (рис. 1, 2) показывает, что существует несколько механизмов разрушения конструкций. Для конструкций из ПКМ (при соблюдении технологических требований к склеиванию), наиболее часто встречающимся механизмом разрушения является разрушение основных склеиваемых конструкций - обычно это межслойное разрушение/разрыв ПКМ. По мнению авторов работы, указанное справедливо лишь при условии, что параметры клеевого соединения (например, его площадь) выбраны обоснованно.

При этом, поставщики указывают на возможность разрушения типа «нарушение адгезии», для предотвращения требуя выбора надлежащего состава и подготовки поверхности. Для конструкций из металла, наиболее часто встречается разрушение клеевого слоя.

Склеиваемые элементы	ПКМ	Фанера	Алюминиевый сплав	Нержавеющая сталь
ПКМ	10МПа			
Фанера		5МПа		
Алюминий			10...15МПа*	
Нержавеющая сталь				8...12МПа*



Разрушение склеиваемого материала

Разрушение клеевого состава, * - требует подготовки поверхности

Рисунок 2 – Прочность при межслойном сдвиге и механизм разрушения склеенной конструкции из различных материалов

Действующие нагрузки

Известно, что для катамаранов малых размерений определяющие при проектировании конструкций является местная прочность, а общая обеспечивается с большим запасом и при проектировании просто проверяется [1]. В рассматриваемом случае, при выбранной схеме сборке блоков судна, доминирующей как раз оказывается общая прочность и напряжения, которые могут возникать в местах соединений. По данным стандарта ISO12215-7 [1] для рассматриваемого моторного катамарана общая поперечная прочность проверяется при следующих нагрузках (рис. 3):

- Момент при скручивании вокруг продольной оси M_{TD} ;
- Поперечный изгибающий момент M_B ;
- Поперечной сдвиг в вертикальной плоскости F .

Расчетные силы и моменты определяются с использованием методики стандарта ISO 12215-7 [4]:

$$M_{TD} = k_{DC}^{0.5} \frac{m_{LDC}}{1000} (9.81 k_{DYNM}) \times 0.076 L_{DIAG}$$

$$M_B = k_{DC}^{0.5} \frac{m_{LDC}}{1000} (9.81 k_{DYNM}^{0.5}) \times \frac{B_{CB}}{8}$$

$$F = 0.25 k_{DC}^{0.5} \frac{m_{LDC}}{1000} (9.81 k_{DYNM})$$

где k_{DC} – коэффициент проектной категории, м;

m_{LDC} – масса судна в состоянии полной загрузки, кг;

k_{DYNM} – коэффициент динамической нагрузки, 1/g;

L_{DIAG} – диагональная длина судна, м;

B_{CB} – ширина между центрами величины корпусов, м.

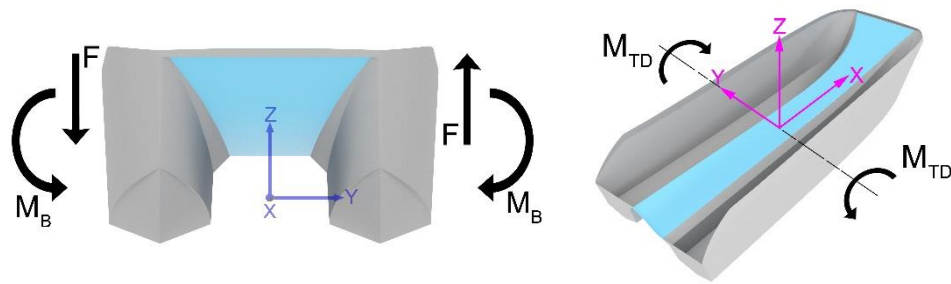


Рисунок 3 – Схема расчетных нагрузок

Модель и допущения

Для обоснованного выбора параметров клеевого соединения, выполнен МКЭ анализ напряжений в клеевом слое при нагрузках, характерных для расчета общей прочности многокорпусного судна. В рассматриваемом случае для обеспечения прочности имеет значение площадь и форма соединения, а также физико-механические характеристики клеевого состава.

Конечно-элементная модель представляет собой твердотельную трехмерную модель соединения с явным моделированием клеевого слоя. Сетка конечных элементов уточняется в районе компаунда.

На грани, являющиеся продолжением корпуса, накладывается граничное условие жесткой заделки. Грани моста, лежащие в диаметральной плоскости катамарана, жестко связываются с точкой, соответствующей центру тяжести продольного сечения моста. В этой точке по очереди прикладываются расчетные нагрузки.

В расчете используются следующие допущения:

- Материал моста и корпуса считается изотропным со средним модулем упругости для стеклопластика. Характеристики материала компаунда приняты по данным производителя.
- Прочность корпуса и моста при заданных условиях считается обеспеченной. Адгезионная прочность между компаундом и стеклопластиком считается обеспеченной.
- Допускаемыми напряжениями в конструкции принимается предел прочности материала компаунда.

Результаты моделирования

В результате получены поля суммарных перемещений и эквивалентных напряжений (рис. 4, 5) в клеевом слое. Результаты показывают, что с учетом использованных допущений и принятых в расчете условий нагружения прочность конструкции обеспечивается с коэффициентами запаса k_i по эквивалентным напряжениям по Мизесу для случаев: скручивания $k_{TD} = 4.27$, поперечного изгиба $k_B = 15.31$ и сдвига $k_S = 7.43$. Результаты справедливы для случая, когда прочность материала компаунда не превышает адгезионную прочность и прочность материала фланцев соединения на отрыв слоев ПКМ.

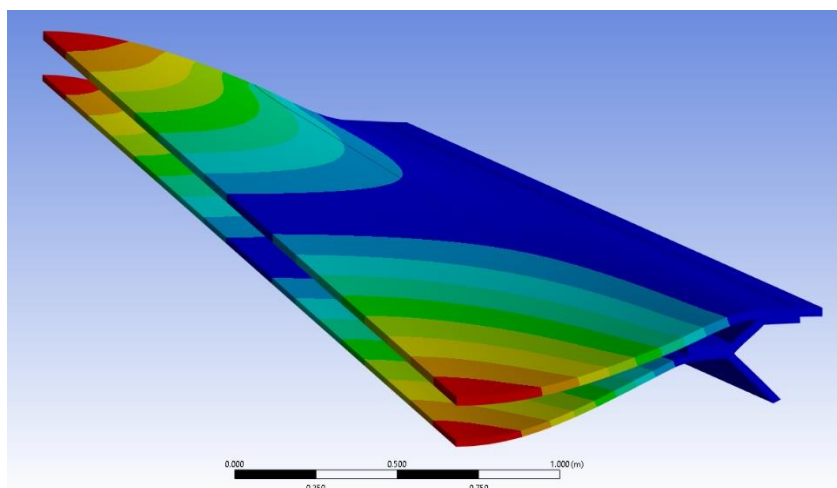


Рисунок 4 – Поле суммарных перемещений под действием скручивающего момента M_{TD}

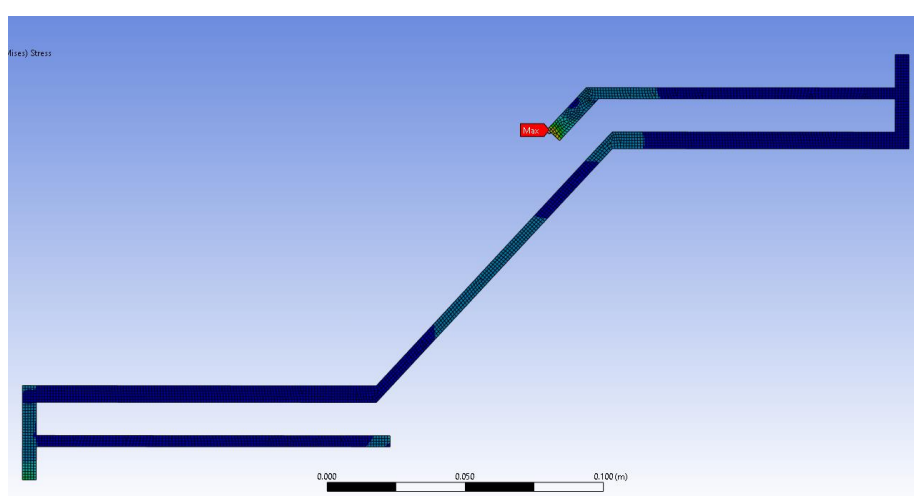


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения по Мизесу под действием скручивающего момента M_{TD} в сечении клеевого слоя

Требования правил КО и стандартов

Правилами РМРС [2] предусмотрено использование адгезионных составов в виде клеев и компаундов для соединения конструкций из ПКМ. При этом, они должны быть совместимы с материалами соединяемых элементов, обеспечивать высокую прочность соединения с учетом заданного диапазона рабочих температур, быть стойкими к старению, воздействию влаги, а также масло- и нефтепродуктов. Однако, правила РС не устанавливает коэффициенты запаса прочности для клеевых соединений. Подобное же упущение содержится в правилах большинства КО.

В правилах GL [3] для клеевых соединений конструкций из ПКМ установлен коэффициент запаса 2,5. В стандарте ISO12215-5:2019 [4] коэффициент запаса прочности для клеевых соединений k_s устанавливается через коэффициент качества производителя k_{BV} и коэффициент, учитывающий применяемый расчетный метод k_{AM} :

$$k_s = 2 / (k_{BV} + k_{AM})$$

Типовые значения $k_{AM} = 0,9 \dots 1,0$ и $k_{BV} = 0,7 \dots 1,0$, что определяется применяемым методом расчета и применяемым методом постройки корпуса; для рассматриваемого судна обе величины будут составлять 1,0.

Заключение

Расчеты, выполненные численными методами, показывают, что клеевые соединения могут быть использованы как способ соединения блоков конструкции малого катамарана из ПКМ [5]. Исходя из результатов расчетов, прочность клеевого слоя обеспечена во всех рассмотренных случаях. Результаты показывают, что наиболее высокие напряжения наблюдаются при скручивании судна относительно поперечной оси.

Дальнейшего исследования требуют вопросы адгезии, а также прочности ламината на разрыв между слоями, которые могут оказаться критическими для исследуемого судна. Также, необходим учет циклических нагрузок и усталости материала клеевого слоя. Одним из путей повышения прочности на отрыв слоев ПКМ является применение эпоксидных смол. Адгезионная прочность проверяется проведением испытаний образцов.

Список литературы:

1. Nazarov A. Composite High Speed Craft: Practical Design Approaches// 4nd Chesapeake Power Boat Symposium - Annapolis, USA, 2014.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, 2025.
3. Rules for Classification and Construction Ship Technology, Special Craft, High Speed Craft, Germanischer Lloyd, 2012.
4. ISO 12215 - 7 Small craft - Hull construction - Scantlings - Part 7: determination of loads for multihulls and of their local scantlings using ISO 12215-5.
5. Пассажирский катамаран: пат. Рос. Федерация № 2025501081/49; заявл. 26.02.2025.

